



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**UTVÁŘENÍ MAZACÍHO FILMU V PODDAJNÉM
KONTAKTU**

LUBRICANT FILM FORMATION IN COMPLIANT CONTACT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Jaroš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Nečas, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Tomáš Jaroš**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. David Nečas, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Utváření mazacího filmu v poddajném kontaktu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Mazací procesy v poddajných kontaktech jsou obtížně studovatelné s využitím konvenčních měřicích metod. Důvodem je jednak nízký modul pružnosti kontaktních těles, ale zejména velmi nízká odrazivost povrchů. Tyto kontakty se přitom vyskytují v řadě technických i biologických aplikací. Popis procesu formování mazacího filmu tak přinese fundamentální poznatky v oblasti poddajných kontaktů.

Typ práce: výzkumná

Projekt: specifický vysokoškolský výzkum

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem je objasnit vliv kinematických podmínek na vývoj tloušťky mazacího filmu v poddajném kontaktu. Experimenty budou realizovány za podmínek čistého valení, částečného pozitivního a částečného negativního prokluzu.

Dílčí cíle diplomové práce:

- nalézt vhodný materiál, který umožní popsat mazací procesy v poddajném kontaktu (modul pružnosti zvoleného materiálu nesmí přesáhnout 1 GPa),
- definovat experimentální podmínky, které se vyskytují v typických aplikacích poddajných kontaktů,
- odladit algoritmus měřicí metody a porovnat výsledky s doposud publikovanými studiemi,
- posoudit vliv kinematických podmínek na formování mazacího filmu v kontaktu.

Požadované výstupy: publikace, průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2017.pdf

Seznam doporučené literatury:

FOWELL, M.T., C. MYANT, H.A. SPIKES a A. KADIRIC. A study of lubricant film thickness in compliant contacts of elastomeric seal materials using a laser induced fluorescence technique. Tribology International. 2014, 80, 76-89.

MYANT, C., T. REDDYHOFF a H.A. SPIKES. Laser-induced fluorescence for film thickness mapping in pure sliding lubricated, compliant, contacts. Tribology International. 2010, 43(11), 1960-1969.

REDDYHOFF, T., J. H. CHOO, H. A. SPIKES a R. P. GLOVNEA. Lubricant Flow in an Elastohydrodynamic Contact Using Fluorescence. Tribology Letters. 2010, 38(3), 207-215.

ALBAHRANI, S., D. PHILIPPON, P. VERGNE a J. BLUET. A review of in situ methodologies for studying elastohydrodynamic lubrication. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. 2015, 230(1), 86-110.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.

ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá studiem utváření mazacího filmu v poddajném kontaktu. Primární pozornost je věnována vlivu unášivé rychlosti a stupně prokluzu na centrální tloušťku filmu. Na základě rešeršní studie dostupných experimentálních metod byla pro splnění cílů práce odladěna metoda na principu fluorescenční mikroskopie. Experimenty byly realizovány v konfiguraci ball-on-disk. Nejprve byla provedena validace metody, kdy byl analyzován tuhý kontakt keramické kuličky a skleněného disku. Jelikož se naměřené hodnoty velmi dobře shodovaly s teoretickou predikcí, byla následně využita kulička z pryžového materiálu NBR, který se běžně používá při výrobě břitových těsnění a o-kroužků. Měření byla provedena za čistého valení a různých stupňů prokluzu při uvažování středních rychlostí v rozsahu 10 až 400 mm/s. Bylo aplikováno konstantní zatížení o velikosti 0,2 N. Naměřená data byla následně srovnána s teoretickými predikcemi pro poddajné kontakty. Výsledky ukázaly, že tloušťka mazacího filmu postupně narůstá se vzrůstající střední rychlostí, což odpovídá teoretickému předpokladu. Oproti teorii byl také prokázán zřejmý vliv stupně prokluzu na formování maziva. V závěrečné části práce jsou naměřená data konfrontována s doposud publikovanými vědeckými studiemi, kdy jsou rovněž naznačeny určité limitace této práce a jsou navržena doporučení pro další zpřesnění použité metody.

KLÍČOVÁ SLOVA

fluorescenční mikroskopie, poddajný kontakt, tloušťka filmu, formování maziva, isoviskózní elastohydrodynamické mazání, kinematické podmínky

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the study of film formation in compliant contact. Primary attention is dedicated to the influence of the entrainment speed and slide-to-roll ratio (SRR) on the central film thickness. Based on a research study of the available experimental methods, the fluorescence microscopy was used to achieve the aim of the work. Experiments were realized in ball-on-disk configuration. Firstly, a validation of the method was performed where the solid contact of the ceramic ball and the glass disk was analyzed. Since the measured values were in a good agreement with the theoretical prediction, a ball of NBR rubber material, which is commonly used for production of lip seals and o-rings, was subsequently used. The experimental measurements were performed under pure rolling and rolling/sliding conditions when the entrainment speeds varied in the range from 10 to 400 mm / s. A constant load of 0.2 N was applied. The measured data were then compared to the theoretical predictions for compliant contacts. The results showed that the thickness of the lubricating film gradually increases with increasing entrainment speed, which corresponds to theoretical assumption. Against expectations, evident influence of SRR on the film formation has been observed. In the last part of the thesis the measured data are confronted with previously published studies. Finally, some limitations of this study are discussed and recommendations for further improvement of the used experimental method are suggested.

KEY WORDS

fluorescence microscopy, compliant contact, film thickness, film formation, isoviscous elastohydrodynamic lubrication, kinematic conditions

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JAROŠ, T. *Utváření mazacího filmu v poddajném kontaktu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 68 s. Vedoucí diplomové práce Ing. David Nečas, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji Ing. Davidu Nečasovi, Ph.D. za jeho odborné vedení a cenné rady při vypracovávání této diplomové práce. Dále děkuji rodině a přátelům, kteří mi byli oporou během celého studia.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci Utváření mazacího filmu v poddajném kontaktu vypracoval samostatně za pomoci odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 19. května 2017

.....
vlastnoruční podpis autora

OBSAH

1 ÚVOD	12
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	13
2.1 Poddajný kontakt	13
2.2 Přehled experimentálních metod pro měření tloušťky filmu	15
2.2.1 Optická interferometrie	16
2.2.2 Fluorescenční metoda	16
2.3 Fluorescenční mikroskopie v tribologii	18
3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	28
3.1 Zhodnocení poznatků získaných na základě rešerše	28
3.2 Cíl práce	29
4 MATERIÁL A METODY	30
4.1 Fluorescence	30
4.2 Experimentální aparatura	30
4.3 Metodika a podmínky měření	31
4.4 Algoritmus vyhodnocení tloušťky filmu	32
5 VÝSLEDKY	35
5.1 Analýza použitých materiálů	35
5.1.1 Měření intenzity fluorescence	36
5.1.2 Výběr vhodného poddajného materiálu	37
5.2 Experimentální měření tloušťky filmu v tuhém kontaktu	38
5.2.1 Keramický vzorek	38
5.2.2 Vzorek z fenolové pryskyřice	39
5.3 Experimentální studium tloušťky filmu v poddajném kontaktu	40
5.3.1 Čisté valení	40
5.3.2 Negativní prokluz	42
5.3.3 Pozitivní prokluz	47
5.4 Vliv stupně prokluzu na centrální tloušťku filmu	53
6 DISKUSE	55
6.1 Ověřovací experimenty	55
6.2 Vliv materiálu	55
6.3 Vliv maziva	56
6.4 Vliv střední rychlosti	56
6.5 Vliv stupně prokluzu	57
6.6 Limitace použité metody	58
7 ZÁVĚR	59
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	60
9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	64
9.1 Seznam použitých zkratek	64
9.2 Seznam použitých symbolů	64
10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	65
11 SEZNAM PŘÍLOH	68

1 ÚVOD

Diplomová práce se zabývá odladěním metody indukované fluorescence pro měření tloušťky filmu v kontaktu poddajných těles. Pro výzkum kontaktů tuhých těles, které mají modul pružnosti řádově v desítkách až stovkách GPa, se běžně využívají různé metody jako například optická interferometrie a elektrické metody. Tyto metody není možné aplikovat v případě poddajných těles, jelikož se tyto materiály vyznačují nízkou odrazivostí (znemožňující využití interferometrie) a současně nízkou vodivostí (limitace s ohledem na metody elektrické). Tělesa s nízkým modulem pružnosti se objevují v mnoha biologických i inženýrských aplikacích. V biologických aplikacích se jedná například o synoviální klouby, tření pokožky, kontaktní čočky či kontakt jazyka a patra při zpracování potravy. Inženýrskou aplikací poddajného kontaktu je např. hřídelové břitové těsnění či o-kroužek.

Princip měřicí metody spočívá v excitaci mazacího filmu v kontaktu, který díky fluorescenčnímu barvivu vyzáří zpět záření emisní. Rozlišení excitačního a emisního záření je možné díky tzv. Stokesovému posunu, kdy je emitovaná vlnová délka vyšší než vlnová délka excitačního záření [1]. Příslušnými filtry můžeme tato dvě záření odlišit a snímat pouze intenzitu emisního záření, která slouží k vyhodnocení tloušťky mazacího filmu v kontaktu. Některé mazací filmy mohou vykazovat fluorescenci přirozeně, ale častěji se do nich musí přidávat speciální fluorescenční barviva, která zajistí dostatečné emisní záření.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2

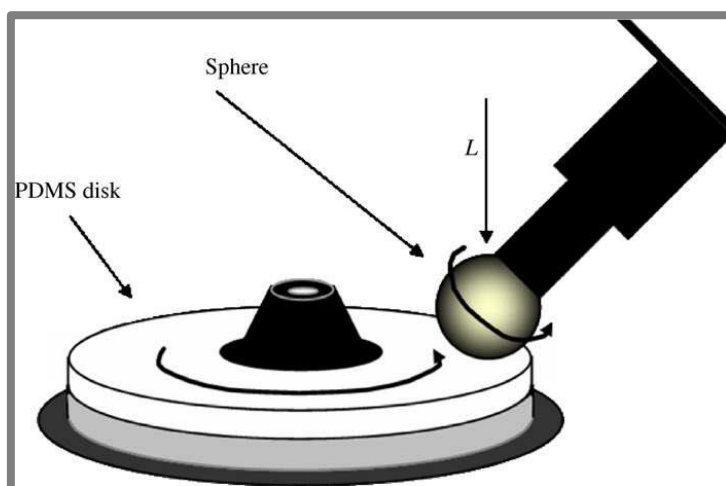
Následující kapitola se zabývá problematikou poddajných kontaktů, přehledem experimentálních metod využívaných v oblasti tribologie a dále fluorescenční mikroskopii, která na základě dostupné literatury představuje vhodnou metodu pro studium poddajných kontaktů.

2.1 Poddajný kontakt

2.1

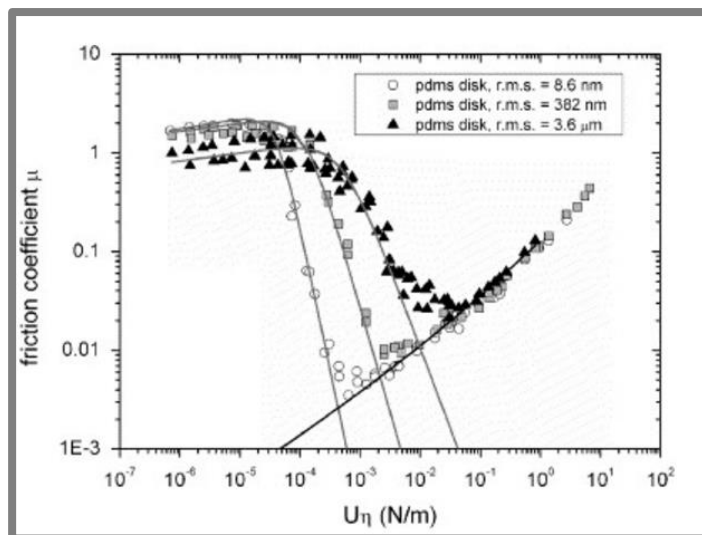
Jako poddajný kontakt lze chápat kontaktní dvojici, z níž alespoň jedno těleso je z materiálu, jehož modul pružnosti se pohybuje v hodnotách menších než 1 GPa. Tyto kontakty lze pozorovat v mnoha inženýrských a biologických aplikacích. Typickým příkladem jsou automobilové stěrače [2] nebo pneumatiky [3]. Z oblasti biologie lze jako příklad uvést studii [4], kdy autoři měřili tření v potravinách, čímž simulovali podmínky v dutině ústní. Dalším příkladem je synoviální kloub [5]. Pro poddajné kontakty je charakteristické, že v kontaktu nedochází k výraznému zvýšení tlaku maziva, jako lze pozorovat u tuhých kontaktů. Proto nedochází ke změně viskozity maziva vlivem tlaku, což znamená, že poddajné kontakty se nachází v tzv. iso-viskózním elastohydrodynamickém (I-EHL) mazacím režimu [6].

Měření tření v poddajném kontaktu se zabývali de Vicente a kol. [7]. Autoři se pokusili rozlišit příspěvek valivého a kluzného tření. Valivé tření vyplývá z relativních pohybů kontaktních dvojic ke kontaktu, kluzné tření vzniká z relativního pohybu dvou dotýkajících se povrchů. Měření probíhalo v kontaktu ocelové kuličky a silikonového disku na zařízení Mini traction machine (MTM na Obr. 2-1) pro stejné kluzné a unášivé rychlosti, ale při různých obvodových rychlostech kontaktní dvojice. Díky tomuto přístupu bylo možné separovat valivé a kluzné tření a vykreslit Stribeckovy křivky. Autoři také potvrdili, že tření při různých stupních prokluzu (SRR), kvůli povrchové adhezi a elastickým hysterezím elastomerů, na kluzné rychlosti téměř nezávisí.



Obr. 2-1 Schématický princip MTM [6].

V publikaci [6] byla použita kontaktní dvojice kuličky a disku z poddajného materiálu polydimethylsiloxane (PDMS). Autoři zde měřili Stribeckovy křivky také na MTM. Bylo zjištěno, že drsnost povrchu ani hydrofobicita neovlivňují koeficient tření v I-EHL kontaktu. Nicméně se zvyšující se drsností povrchu dochází k rozšíření hranic mezního a smíšeného režimu mazání. Tato naměřená data jsou zobrazena na Obr 2-2.



Obr. 2-2 Stribeckova křivka pro tři různé drsnosti povrchu disku [6].

Většina prací zaměřených na studium poddajných kontaktů se zabývala měřením koeficientu tření v plně zaplaveném kontaktu. Byly mapovány Stribeckovy křivky pro různé faktory, jakými jsou drsnost povrchu [6], modul pružnosti [8] či podmínky mazání [3]. První publikace zaměřená na studium tloušťky filmu v poddajném kontaktu byla od autorů Robertse a Tabora v roce 1968 [9]. Měření tloušťky filmu bylo realizováno mezi plochou skleněnou deskou a pryžovou polokoulí, respektive poloválcem, pomocí monochromatické optické interferometrie. Předchozí publikace ukázaly, že konvenční elastomery mají vysokou drsnost a špatnou odrazivost, proto byl poddajný vzorek potažen tenkou vrstvou hladkého plastu, která navíc obsahovala hliník pro zlepšení odrazivosti. Tloušťka filmu v poddajných kontaktech v kombinaci s vysokými rychlostmi a viskozitou může dosahovat až několika desítek μm . V těchto případech je použití metody optické interferometrie značně omezené, protože maximální měřitelná tloušťka filmu je přibližně $2\ \mu\text{m}$.

Myant a kol. [10] v roce 2010 a Fowell a kol. [11] v roce 2014 úspěšně aplikovali metodu laserem indukované fluorescence při měření tloušťky filmu v poddajném kontaktu, kde poukázali na vhodnost této metody bez nutné speciální úpravy vzorků. Výše uvedené publikace jsou detailněji popsány níže.

2.2 Přehled experimentálních metod pro měření tloušťky filmu

S ohledem na zaměření diplomové práce bude primární pozornost věnována měření tloušťky mazacího filmu. Pro tento účel je třeba nejprve zvolit vhodnou experimentální metodu. Výzkumy týkající se teorie hydrodynamického mazání se začaly objevovat v 50. letech 19. století. Přehled použitých metod pro zkoumání tloušťky filmu lze najít v publikacích [12, 13]. Shrnutím informací z obou článků lze metody zkoumající tloušťku filmu v kontaktu rozdělit do dvou skupin.

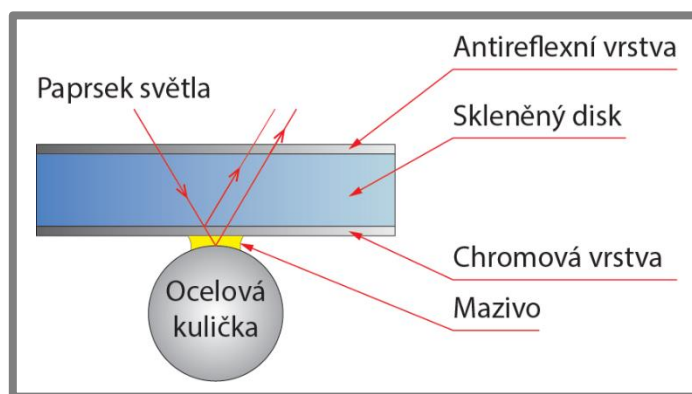
První použitelnou skupinou pro měření tloušťky filmu jsou elektrické metody založené na změně napětí, na změně elektrického odporu či změně kapacity. Použití této metody založené na změně elektrického odporu představil v roce 1952 Lane a kol. [14]. Byla zde měřena tloušťka filmu v ozubení. Autoři uváděli složitost určení absolutní tloušťky filmu, protože elektrické vlastnosti použitých minerálních olejů se mění v závislosti na objemu. Dalším příkladem této metody může být studium formování maziva mezi kuličkou a kroužkem valivého ložiska, kterým se zabýval Wilson [15]. Z uvedených příkladů vyplývá, že pro použití elektrických metod musí být kontaktní dvojice z vodivého materiálu, popř. je nutné na základový materiál nanést vodivou vrstvu, jak realizoval Dowson a kol. [16]. Tím však může dojít k ovlivnění mechanických vlastností původního materiálu a tím i k ovlivnění výsledků měření. Další nevýhodou je skutečnost, že elektrické metody poskytují pouze informace o tloušťce filmu v jednom bodě, proto neumožňují pozorování charakteru utváření mazacího filmu.

Druhou možností, jak lze měřit tloušťku filmu jsou optické metody umožňující přímé pozorování kontaktu. Z těchto metod jsou pro měření tloušťky filmu použitelné optická interferometrie a fluorescenční mikroskopie. Optická interferometrie je v současnosti nejpoužívanější a velmi dobře odladěná metoda pro měření tloušťky filmu. Její použití představil Kirk v roce 1962 [17]. Dalších 30 až 40 let pak docházelo k jejímu postupnému vývoji a zpřesňování. Mezi prvními, kdo srovnávali experimentální data s teoretickou predikcí, byli Cameron a Gohar v roce 1966 [18]. Možnost měření poddajných kontaktů optickou interferometrií představili Roberts a Tabor v roce 1968 [9], kteří nanášeli na pryžové vzorky hliníkový povlak, ale nebyli schopni měřit tloušťku větší jak 2 μm . V roce 2010 Myant a kol. [19] použili tuto metodu pro měření tloušťky filmu mezi skleněnou deskou a ocelovou kuličkou, která byla potažena 2 mm silnou vrstvou PDMS materiálu. Při zatížení kontaktu 3 mN autoři naměřili tloušťku filmu od 0,05 do 1,25 μm .

Druhou optickou metodou využitelnou při studiu poddajných kontaktů je fluorescenční mikroskopie. Tato technika není zdaleka tak rozšířená jako optická interferometrie. První publikace byla od Smarta a Forda v roce 1974 [20], v níž autoři měřili tloušťku filmu na rotujícím válci. Gabeli a Poll se v roce 1992 [21, 22, 23] zabývali zkoumáním formování maziva mezi břitovým těsněním a skleněnou hřídelí. V roce 2014 Fowell a kol. [11] měřili tloušťku filmu pro tři konfigurace poddajného kontaktu.

2.2.1 Optická interferometrie

Optická interferometrie je v současné době jednou z nejrozšířenějších metod pro měření tloušťky filmu v kontaktu. Princip této metody je znázorněn na Obr. 2-3. Měření tloušťky filmu spočívá v osvětlení kontaktu, který se skládá ze skleněného disku s chromovou polopropustnou vrstvou na spodní straně a valivého elementu s lesklým povrchem, kdy se jedna část paprsku odrazí právě od chromové vrstvy a druhá část od lesklého valivého elementu. Obě tyto části paprsku směřují do objektivu, a jelikož paprsek odražený od valivého elementu urazí delší vzdálenost, dojde k vzájemnému posunu jejich fází a tím ke změně intenzity a vlnové délky světla. Kalibrací se pak každému odstínu barvy přiřadí tloušťka filmu. K osvětlení kontaktu se obvykle používá bílé světlo [24, 25].



Obr. 2-3 Schéma principu optické interferometrie.

Výhody:

- Vysoká přesnost.
- Rozlišitelnost 1 nm.
- Známá odladěná metoda.

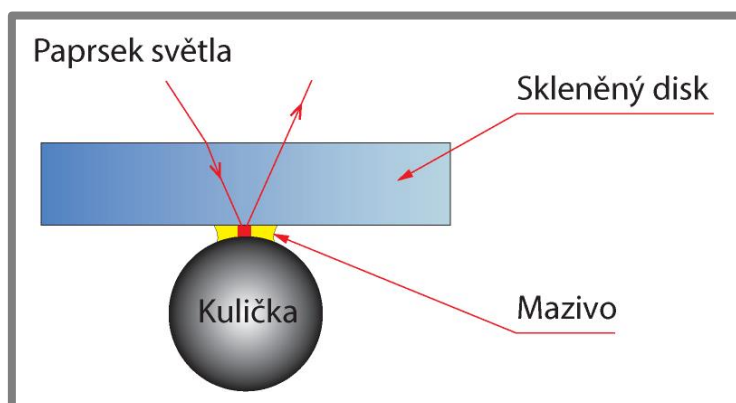
Nevýhody:

- Nutnost lesklého povrchu valivého elementu.
- Nutná nízká drsnost povrchu valivého elementu.
- Omezený rozsah měřených tlouštěk.

2.2.2 Fluorescenční metoda

Princip fluorescenční metody (Obr. 2-4) spočívá v osvětlení (excitaci) fluorescenčního barviva, tzv. fluoroforu, který absorbuje dopadající fotony a následně vyzařuje (emituje) zpět světelné záření o menší energii a vyšší vlnové délce. Fluorescenční mikroskop obsahuje excitační filtry, emisní filtry a dichroické zrcátko. Oproti optické interferometrii zde nedochází k porovnávání fázového posunu světelného paprsku, tudíž odpadá nutnost lesklého a hladkého povrchu valivého elementu. Kalibrace

spočívá v přiřazení určité intenzity emise k určité tloušťce filmu. Jako excitační zdroj se obvykle používá rtuťová lampa nebo laser [1, 10, 11, 26].



Obr. 2-4 Schéma principu fluorescenční mikroskopie.

Výhody:

- Měření neodrazivých materiálů.
- Měření nezávisle na drsnosti povrchů.
- Měření velkého rozsahu tlouštěk filmu.
- Přirozená fluorescence minerálních olejů (není nutné přidávat fluorescenční barviva).
- Možnost separace jednotlivých složek maziva.

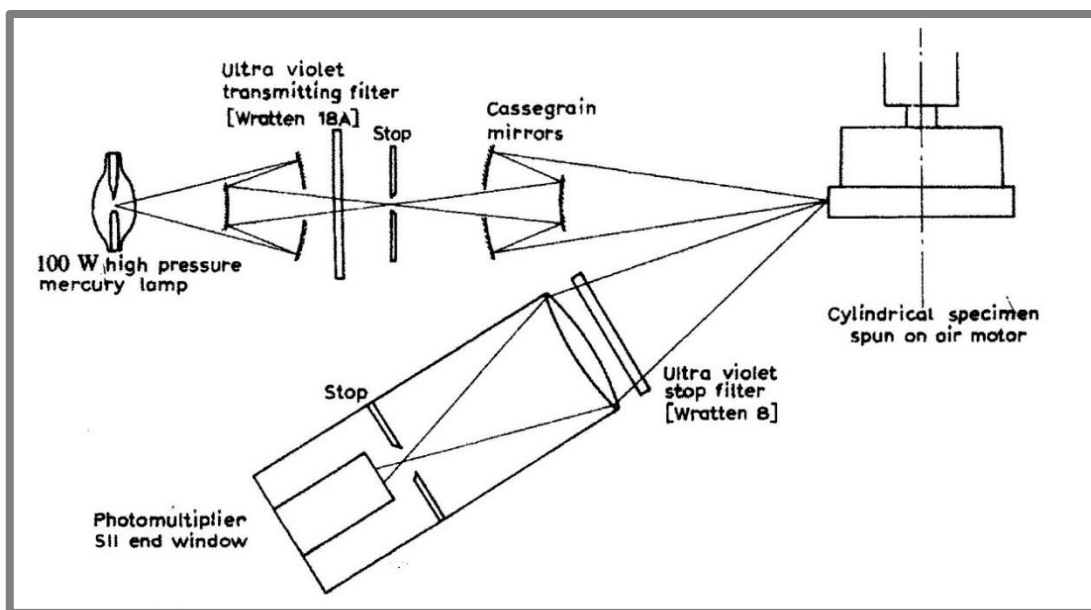
Nevýhody:

- Nižší přesnost
- Minimální měřitelná tloušťka od desítek nm.
- Přirozená fluorescence některých přísad polymerů.

Na základě rešerše metod používaných pro měření tloušťky filmu se jako nejvýhodnější metoda zdá být fluorescenční mikroskopie. Další text tak přibližuje využití fluorescenční metody v oblasti tribologických analýz.

2.3 Fluorescenční mikroskopie v tribologii

První publikace představující využití fluorescenční mikroskopie začaly vznikat v druhé polovině dvacátého století. Pilotní studii předložili Smart a Ford [20]. V publikaci byly detailně popsány výhody fluorescenční mikroskopie oproti optické interferometrii, kapacitní, rentgenové a odporové metodě. Autoři pomocí fluorescenční metody měřili tloušťku volného olejového filmu na rotujícím válci, který nebyl v kontaktu s dalším tělesem. Výsledky byly interpretovány ve vztahu k hladovění valivých ložisek. Měřicí aparatura je schematicky znázorněna na Obr. 2-5. Byla zde využita rtuťová lampa s optickým systémem a filtrem, který propouští vlnovou délku 365 nm.



Obr. 2-5 Schéma použité měřicí aparatury [20].

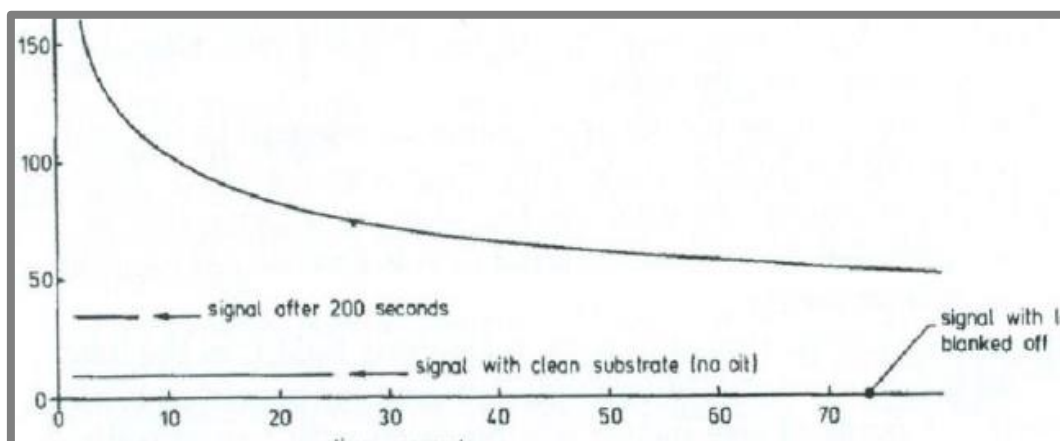
Autoři mimo jiné diskutovali výsledky, že při vysokých rychlostech nebyla tloušťka mazacího filmu dostatečná pro vnesení oleje do kontaktu a může tak docházet k hladovění. Dále bylo detekováno kolísání tloušťky maziva spojené s rychlostí otáčení, kde docházelo k tvorbě kapiček oleje na povrchu válce. Pro typický olej používaný v plynových turbínách (Castrol 3C) při 20 °C bylo dodávání maziva do kontaktu nedostatečné pro oddělení dvou povrchů.

O čtyři roky později autoři R. A. J. Ford a C. A. Foord [27] navázali na předchozí publikaci, kdy se nezabývali přímo tloušťkou filmu, ale chováním použitých mazacích olejů. Namísto rtuťové lampy zde byla použita UV lampa a následně modrý laser. Systém s rtuťovou lampou sice demonstruje praktické použití metody, ale bylo zde zmíněno, že systém osvětlování laserem je jednodušší na konstrukci, má delší pracovní vzdálenost a umožňuje širší rozsah použití. Autoři nejprve realizovali experimenty zabývající se pozorováním míry fluorescence a penetrace sedmi různých maziv, kdy byl výsledkem popis vhodnosti použití jednotlivých maziv pro měření určitého rozsahu tlouštěk. Dále zde byla zkoumána míra vysvěcování barviva. Tento jev byl demonstrován na turbínovém oleji. V okamžiku excitace docházelo k nárůstu signálu (svítivosti), ale ten po čase opět slábnul a postupně se ustálil. Průběh vysvěcování barviva je vidět na Obr. 2-6. Bylo zjištěno, že po vypnutí laseru lze

po několika minutách vidět částečnou regeneraci vysvícených míst, což bylo zdůvodněno pronikáním čerstvého oleje do vysvícené vrstvy.

Autoři v tomto případě neměřili konkrétní hodnoty tloušťky mazacího filmu, ale zkoumali výhody laseru oproti rtuťové lampě a jeho účinky na mazací oleje, které jsou uvedeny v následujících bodech:

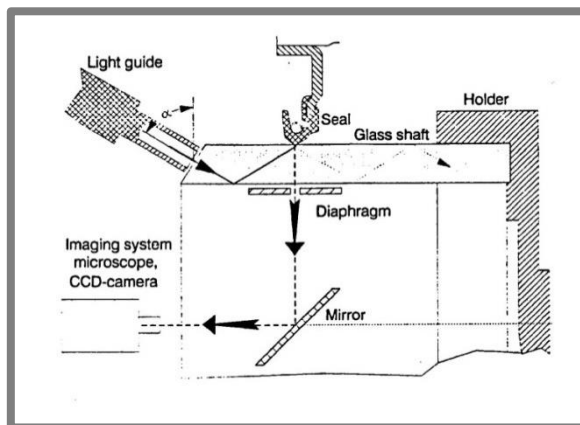
- Konfigurace laboratorního zařízení s laserem je obecně jednodušší, především díky jednoduchému optickému systému a možnosti laserový paprsek snadno nasměrovat do kontaktu.
- Delší pracovní vzdálenost osvětlování laserem umožňuje použití pro zkoumání špatně přístupných oblastí.
- Systém s použitím UV světla (325 nm) způsobuje rapidní zhoršení a nestabilní fluorescenci daného oleje. Je tedy limitován počet kapalin, pro které je tato vlnová délka měření tloušťky filmu vhodná.
- Počáteční testy ukázaly, že použití laseru je mnohem jednodušší a umožňuje zkoumat široký rozsah kapalin. Tento systém také významně potlačoval zhoršování vlastností oleje při ozařování.



Obr. 2-6 Pokles intenzity fluorescence v závislosti na čase [27].

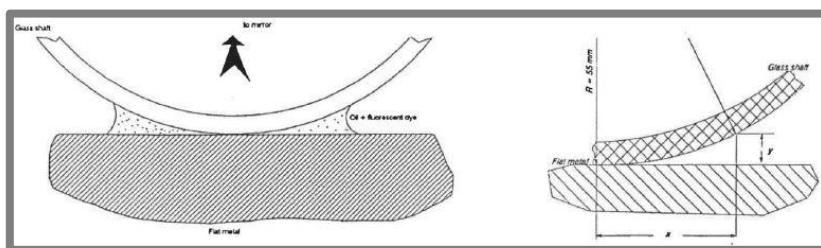
V roce 1992 autoři Gabeli a kol. vydali sérii tří publikací [21, 22, 23], které se zabývaly popsáním formování maziva v kontaktu břitového těsnění a skleněné hřídele. Jako motivaci autoři uvedli zejména značně neprozkoumanou problematiku břitových těsnění i přes jejich častý výskyt v reálných aplikacích. V první části [21] byly použity hodnoty tlaku v těsnění a tloušťky filmu jako vstupní hodnoty pro vytvoření matematického modelu, který popisoval vývoj mazacího filmu mezi břitovým těsněním a hřídelí. Model počítal s viskoelastickým chováním mazacího filmu a vysokou poddajností pryžového těsnění. Druhá část první publikace se zabývala ověřením předchozího modelu. Použili zde metodu, která měřila tloušťku filmu v závislosti na proměnlivosti magnetického odporu maziva obsahujícího feromagnetické částice. V navazující publikaci [23] Poll a kol. hledali vhodnou náhradu elektromagnetické metody. Jako hlavní důvod pro nahrazení předešlé metody zde uvedli neschopnost analyzovat tloušťku filmu přes celý kontakt ve stejný okamžik,

ale pouze vícenásobným bodovým měřením přes šířku břitového těsnění. Jako vhodnou metodu zvolili právě výše uvedenou fluorescenční mikroskopii. Schéma experimentálního zařízení je zobrazeno na Obr. 2-7. Byla zde použita dutá skleněná rotující hřídel, na které bylo nasazeno hřídelové těsnění. Jako zdroj byla zvolena rtuťová lampa s UV-A zářením, které osvětlovalo kontakt pod určitým úhlem a to tak, že pokud paprsek narazil na rozhraní sklo/vzduch, tak se odrazil mimo objektiv. Jakmile se však paprsek záření dostal na rozhraní sklo/olej, tak jeho index lomu umožnil paprsku excitačního záření proniknout do oleje a ten emitoval záření přes zrcadlo do objektivu kamery.



Obr. 2-7 Schéma použité měřicí aparatury [23].

Kalibrace byla prováděna přiložením rovného povrchu ke skleněné hřídeli, kde jejich kontakt byl vyplněn mazivem (Obr. 2-8). Ze známé geometrie bylo možné stanovit tloušťku filmu a tím optický systém zkalibrovat

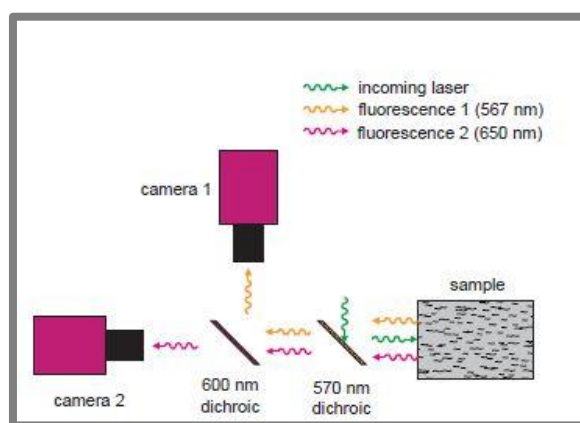


Obr. 2-8 Schéma použité kalibrace [23].

V další části se autoři zabývali optimálním obsahem barviva v oleji. V této části zjistili, že počet stupňů šedi na snímku pořízeném kamerou silně závisel na koncentraci barviva v oleji a mnohem méně na intenzitě světla, kterým kontakt ozářili. Pomocí fluorescenční metody bylo dosaženo rozsahu měření 0 až 10 μm při rozlišitelnosti 0,02 μm .

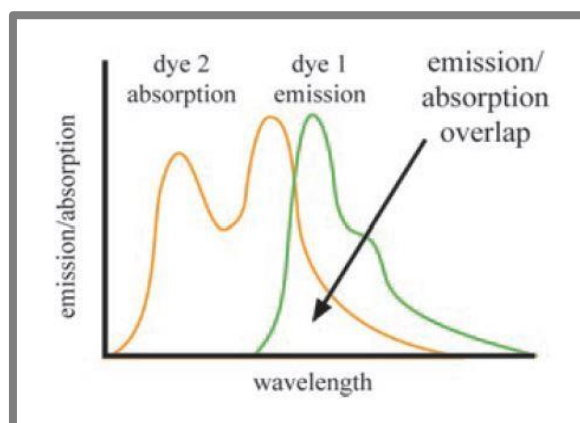
Jednou z limitací fluorescenční metody při měření lesklých povrchů je vznik interference. Tímto problémem se zabývali Sugimura a kol. [28]. Autoři tento problém vyřešili takovým způsobem, že pro kalibraci použili skleněnou čočku. Druhým problémem byla tvorba kavitačních dutin na výstupu filmu z kontaktu, a tím zkreslení pozadí. Tento problém zde nebyl vyřešen, pouze byly podány určité návrhy, jak tuto komplikaci odstranit.

Na přelomu 20. a 21. století autoři Hidrovo a Hart publikovali články [29, 30] o rozšíření fluorescenční mikroskopie v oblasti tribologie. Toto rozšíření spočívalo ve vmíchání dvou barviv, která měla rozdílné excitační a emisní vlnové délky, do oleje. První princip metody [29] autoři nazvali duální emise laserem indukované fluorescence (DELIF). Tato metoda spočívala ve smíchání dvou barviv, která byla buzena stejnou vlnovou délkou, ale měla rozdílnou vlnovou délku emise. Na Obr. 2-9 je vidět schematické znázornění tohoto experimentu. Ze dvou kamer bylo získáno emisní záření každého ze dvou barviv, kdy bylo použitím poměrného principu umožněno normalizovat tato dvě emisní záření, čímž byla vyeliminována nerovnoměrná intenzita osvětlování vzorku v prostoru a reálném čase.



Obr. 2-9 Schéma experimentu (DELIF) [29].

Ve druhé publikaci [30] autoři zavedli pojem reabsorpce emise laserem indukované fluorescence (ERLIF). Tato metoda opět spočívala v přidání dvou barviv do oleje a využití jejich vzájemných excitačních a emisních vlnových délek. Při osvětlení vzorku nastávaly dva jevy: (1) zvyšuje se emisní záření druhého barviva, které bylo buzeno zároveň zdrojem externího osvětlování a emisním zářením barviva prvního. Mnohem významnějším jevem (2) bylo, že emisní záření prvního barviva bylo sníženo v důsledku buzení barviva druhého. V prvním jevu bylo zvýšení emisního záření vůči vnějšímu zdroji zanedbatelné, ale jev druhý nebyl zanedbatelný a bylo nutno s ním počítat. Touto metodou autoři minimalizovali chyby, především nerovnoměrnost intenzity osvětlování vzorků a vliv odrazivosti povrchů. Na Obr. 2-10 je schematicky znázorněn princip reabsorpce.

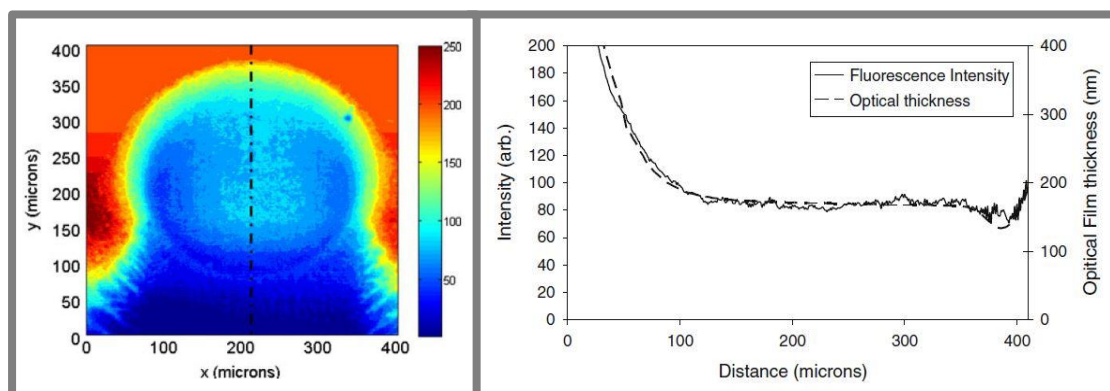


Obr. 2-10 Schématické znázornění principu ERLIF [30].

Pro měření tloušťky filmu metodou DELIF byla použita barviva Pyrromethene 567 a Pyrromethene 650, která byla přimíchána do oleje. Tloušťka filmu byla měřena v klínové mezeře známé geometrie, která vznikla vložením desky mezi dvě rovná sklíčka, kde horní sklíčko bylo na jednom konci podloženo o 110 μm . V práci byly publikovány výsledky tloušťky filmu v závislosti na relativní intenzitě emisního záření. Pro měření tloušťky filmu metodou ERLIF byla využita stejná barviva. Autoři naměřili tloušťky v rozsahu od 5 μm do 400 μm , kde již u tenčích filmů nedocházelo k dostatečné reabsorpci. Tuto teorii podložili měřením tenkého filmu a poměr emise dvou barviv zůstal přes šířku klínové mezery konstantní. Naopak uváděli, že u tenkých filmů je touto metodou vhodné měřit jejich teplotu. Tuto úvahu taktéž podložili experimentem. Autoři v těchto publikacích dosáhli velmi kvalitních výsledků, kdy byli schopni pomocí zmíněných metod eliminovat nedostatky měřicí metody. Především se jednalo o odstranění vlivu odrazivosti materiálů kontaktních dvojic a odstranění vlivu nerovnoměrného osvětlení laserem. S ohledem na složitost principů těchto metod však tyto dva přístupy nebyly v oblasti tribologie dosud opětovně využity při snaze porozumět mazacím procesům.

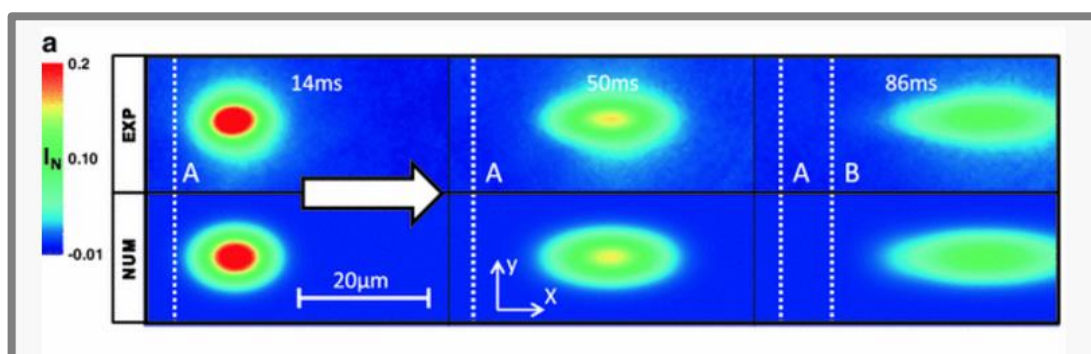
V předchozích publikacích byly velmi dobře zdokumentovány parametry, jako tloušťka filmu a teplota, které mohou být měřeny mnoha konvenčními metodami. Dalším problémem, který není dostatečně prostudován, je proudění maziva, kterým se zabýval Reddyhoff a kol. v roce 2010 [31]. Znalost průtoku maziva kontaktem může přinést značnou výhodu v predikci součinitele tření ve strojních součástech, jejich výkonovou ztrátu a účinnost. EHL kontakt byl tvořen ocelovou kuličkou a skleněným diskem, které byly poháněny nezávisle na sobě. Kontakt byl pozorován fluorescenčním mikroskopem, který byl vybaven laserem o vlnové délce 532 nm. Do použitého maziva autoři přidali 0,05 hm% Eosinu. Experiment spočíval v pořízení snímků čistého valení kuličky po disku. Pro možnost stanovení toku maziva bylo obarvené mazivo dávkováno do dráhy kontaktu a pomocí fluorescenčního mikroskopu bylo pozorováno jeho proudění. Autoři zjistili, že v místě kontaktu byla rychlost proudění maziva téměř konstantní, což připisovali zejména kinematickým podmínkám (čistě valení), kdy dochází k velmi malému bočnímu výtoku a tloušťka maziva je přes šířku kontaktu prakticky konstantní. Centrální tloušťka maziva se pohybovala okolo 200 nm.

Obr. 2-11 vpravo ukazuje profil intenzity emisního záření v řezu procházejícím kontaktem (čerchovaná čára na Obr. 2-11 vlevo) a hodnoty tloušťky filmu získané pomocí optické interferometrie. Z grafu je patrné, že tyto dvě měřicí metody spolu velmi dobře korelují. Vstup do kontaktu je zobrazen v levé části grafu.



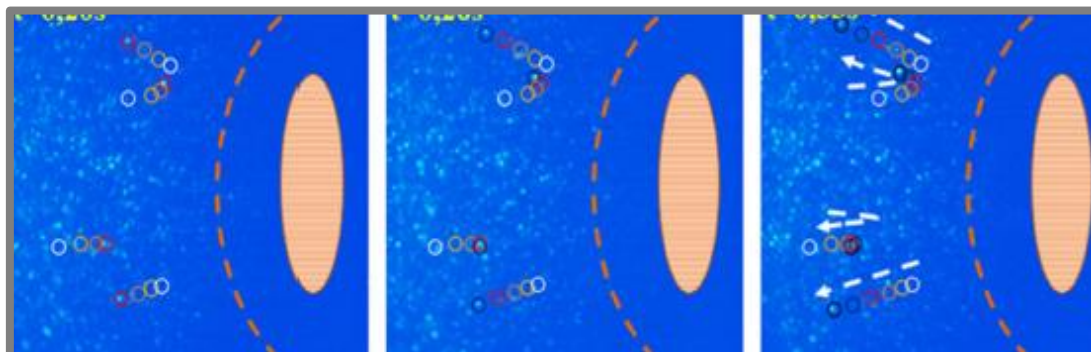
Obr. 2-11 Mapa intenzity fluorescence vlevo; průběh intenzity fluorescence a porovnání s tloušťkou filmu získané z optické interferometrie vpravo [31].

Dalším přístupem, který lze použít při zkoumání toku maziva, je metoda obnovy fluorescence po fotovybělení (FRAP – fluorescence recovery after photobleaching). Ponjavic a kol. [32] použili FRAP ke zkoumání rychlostních profilů a délky skluzu přes tloušťku mazacího filmu v EHL kontaktu. Pro excitaci použili laser s vlnovou délkou 473 nm a pro fotovybělení laser s vlnovou délkou 488 nm. Metodiku autoři ověřili na časoprostorovém rozložení intenzity rovinného Couettova toku mezi dvěma 1 μm vzdálenými deskami. Následně studovali EHD kontakt tvořený ocelovou kuličkou a skleněným diskem. Zatížení bylo 5 N a klzná rychlost činila 360 $\mu\text{m/s}$ pro vytvoření tloušťky filmu 170 nm. Výsledky toku maziva po fotovybělení a teoretickou predikcí pro EHD kontakt jsou na Obr. 2-12.



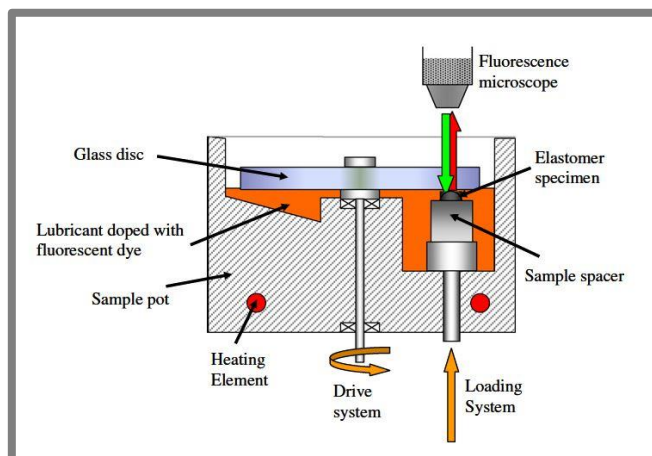
Obr. 2-12 Výsledky formování maziva metodou fotovybělení; srovnání experimentu (nahore) a predikce (dole). Bílá šipka označuje klznou rychlost maziva [32].

Jedním z dalších způsobů pozorování utváření maziva v kontaktu je kombinace fluorescenční mikroskopie a μ -PIV (micro-particle image velocimetry). Tento způsob použili autoři Strubel a kol. [33] pro pozorování trajektorií proudění maziva a pro mapování vektorů rychlostí v EHD kontaktech. Jako excitační zdroj byly použity dva laserové paprsky o vlnové délce 532 nm. Unášivé rychlosti se pohybovaly v rozsahu od 0,005 do 3 m/s při zatížení od 10 do 50 N. Jedním z experimentálních měření byla potvrzena přítomnost zpětného toku maziva ve vstupní oblasti do kontaktu, který se projevoval především v eliptických kontaktech. Výsledek tohoto pozorování je na Obr. 2-13. Barevnými kružnicemi jsou zde vyznačeny vybrané fluorescenční částice a bílými šipkami naznačen směr jejich pohybu.



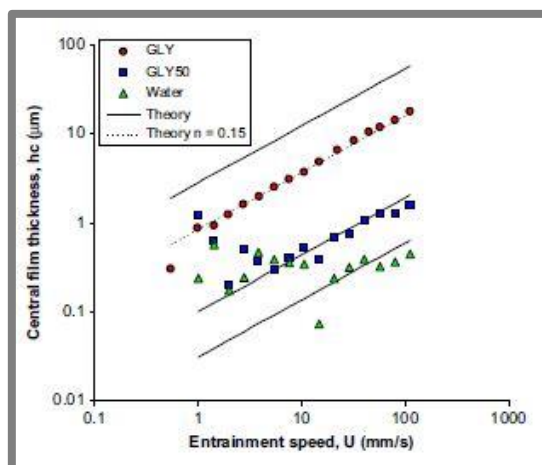
Obr. 2-13 Pozorování zpětného toku fluorescenčních částic (barevné kroužky) v eliptickém kontaktu ($k = 3,4$) ocelového soudečku a skleněného disku při unášivé rychlosti 0,5 m/s a zatížení 50 N [33].

S ohledem na cíle této diplomové práce lze za dvě nejprínosnější práce považovat články publikované v roce 2010 [10], respektive 2014 [11]. Tyto publikace vytvořila skupina autorů Myant a kol. na Imperial College. Ve článku [10] se autoři zabývali predikcí a měřením tloušťky filmu v poddajném kontaktu při malém zatížení. Kontakt byl tvořen půlkulovým elastomerem (PDMS – polydimethylsiloxane) a skleněným diskem, přičemž do kontaktu bylo přiváděno mazivo s rozpuštěným fluorescenčním barvivem. Jednalo se o glycerol s 0,4 hm% barviva Eosin. Kontakt byl excitován laserem o vlnové délce 532 nm. Použité experimentální zařízení je znázorněno na Obr. 2-14.



Obr. 2-14 Schéma experimentálního zařízení [10].

Experimenty byly prováděny za podmínek celkového zaplavení a hladového kontaktu. Experimentální data byla porovnána s teoretickými predikcemi. Rozsah naměřených tloušťek se pohyboval od 200 nm do 25 μm . Na Obr. 2-15 je znázorněn graf centrální tloušťky filmu v kontaktu v závislosti na skluzové rychlosti za podmínek plného zaplavení. Kontakt byl zatěžován 40 mN. Pro mazivo GLY50 a destilovanou vodu byla minimální měřitelná tloušťka okolo 300 nm, přičemž výsledky se shodovaly s teoretickou predikcí. V případě čistého glycerolu (GLY) je zřejmé, že experimentální výsledky byly nižší než teoretický předpoklad tloušťky filmu pro dynamickou viskozitu 1,16 Pas. Velmi dobře se však data shodovala s predikcí v případě viskozity 0,15 Pas. Autoři uváděli jako možné vysvětlení tohoto jevu zvyšující se teplotu



Obr. 2-15 Srovnání teoretických a naměřených tloušťek filmu při plně zaplaveném kontaktu [10].

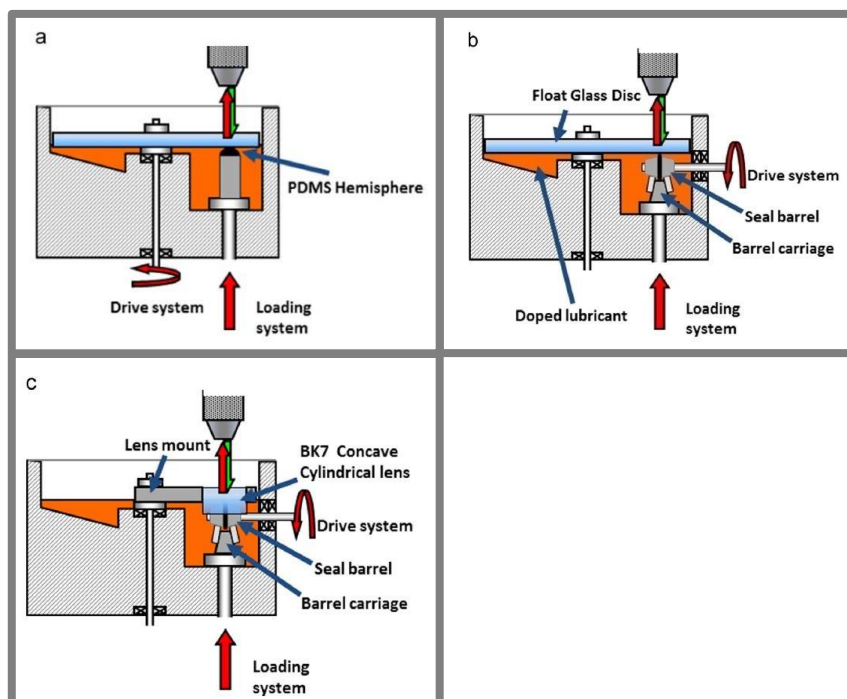
maziva, případně nárůst obsahu vody v kontaktní oblasti. Tato publikace je bezpochyby jedna z nejprínosnějších prací demonstrující využití fluorescenční mikroskopie v oblasti poddajných kontaktů.

Autoři svoje poznatky s ohledem na využití metody shrnuli v několika následujících bodech:

- Není požadována speciální úprava povrchu.
- Získaná mapa tloušťky filmu je snadno porovnatelná s alternativními metodami, které jsou časově náročnější a obtížnější.
- Metoda může být použita pro ověření teoretických modelů, konkrétně pro isoviskózní elasto-hydrodynamické mazání (I-EHL).
- Výsledky získané při podmínkách plně zaplaveného kontaktu se odlišovaly od teoretické predikce. Tyto odchylky jsou připisovány zejména poklesu viskozity maziva v důsledku zvýšení teploty v kontaktu, popřípadě hygroskopickému chování glycerolu.

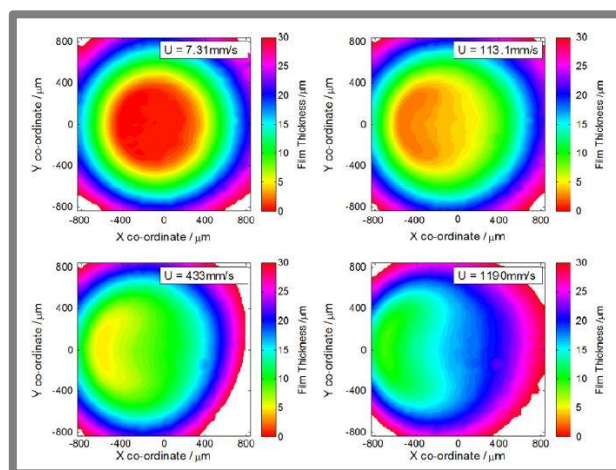
K dalšímu vylepšení metody LIF přispěla publikace [11], která navazuje na článek [10]. Autoři se zde zabývali měřením tloušťky filmu v poddajných kontaktech v I-EHL režimu. Optimálním nastavením zařízení a relativně vysokým poměrem signálu k šumu byli autoři schopni měřit tloušťku maziva (v rozsahu 50 nm až 100 μm) přes celou kontaktní oblast. Byly pozorovány celkem tři různé konfigurace, přičemž tloušťka maziva byla vyšetřována v určitém rozsahu skluzových rychlostí a zatížení. Poddajná tělesa přitlačovaná ke skleněnému disku byla vyrobena ze dvou materiálů, polydimethylsiloxane (PDMS) a fluorocarbon rubber (FKM), který je typicky používaný materiál v aplikaci rotačních těsnění. Osvěcování kontaktní oblasti zajišťoval zelený laser s vlnovou délkou 532 nm. Na Obr. 2-16 jsou zobrazena schémata tří konfigurací pro testování:

- První konfigurace (a) bodového styku je tvořena půlkulovým elastomerem (PDMS) o poloměru 12,7 mm přitlačovaným ke skleněnému disku. Mazivo je do kontaktu dodáváno pomocí otáčejícího se disku.
- Druhá varianta (b) je tvořena o-kroužkem z elastomeru (FKM) a opět skleněným diskem, kde má kontaktní oblast eliptický tvar. O-kroužek má vnitřní průměr 10,4 mm a malý poloměr 1,31 mm. Poháněn není tentokrát disk, ale o-kroužek.
- Ve třetí a poslední konfiguraci (c) byl použit o-kroužek (FKM) proti konkávní válcové BK7 skleněné čočce. O-kroužek a čočka měli stejný kontaktní rádius 12,96 mm. Touto konfigurací je simulován kontakt konformních povrchů hřídel-těsnění.



Obr. 2-16 Schéma tří konfigurací kontaktních oblastí [11].

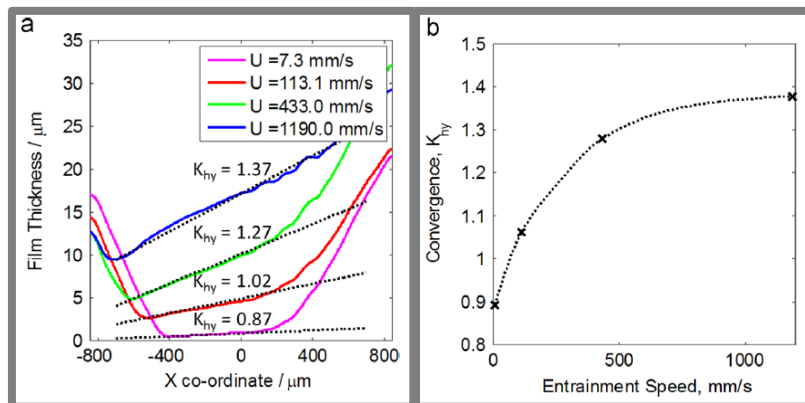
Obr. 2-17 zobrazuje mapu tloušťky filmu pro konfiguraci (a) ve vybraných skluzových rychlostech. Experiment probíhal za podmínek čistého skluzu, aplikované zatížení činilo 23,5 mN. Použité mazivo obsahovalo 75 hm% glycerolu, 25 hm% vody a bylo v něm rozpuštěno 0,01 hm% barviva Rhodamine 6G. Vstup maziva do kontaktu je vždy v pravé části snímku.



Obr. 2-17 Mapa tloušťky filmu pro konfiguraci (a) při zatížení 23,5 N; vstup do kontaktu je vždy vpravo [11].

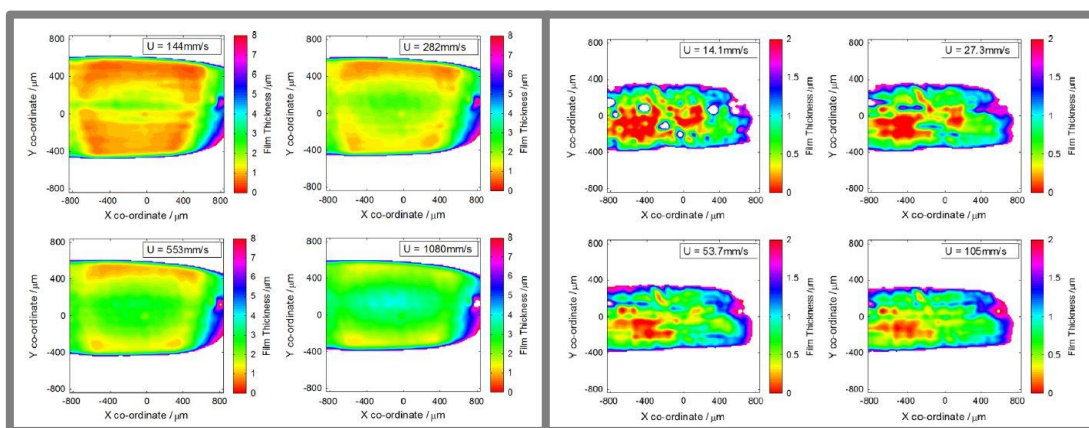
Profily tloušťky filmu středem kontaktu pro $y = 0$ jsou vykresleny na Obr- 2-18 vlevo, kde vstup do kontaktu je vpravo. Zde lze pozorovat formování hydrodynamického klínu, jehož sklon narůstá se zvětšující se rychlostí. Pro každou unášivou rychlost byl určen parametr konvergence $K_{hy} = (h_i - h_o)/h_o$, kde h_i (μm)

a h_0 (μm) jsou tloušťky filmu na vstupu, resp. na výstupu z kontaktu. Vykreslení parametru konvergence je na Obr. 2-18 vpravo, kde je pozorován jeho nejstrmější nárůst při nižších rychlostech a poté dochází k ustálení hodnoty K_{hy} v rozmezí od 1,3 do 1,4



Obr. 2-18 Profily tloušťky filmu středem kontaktu pro $y = 0$ z naměřených dat na Obr. 2-16 vlevo; vykreslení parametru konvergence vpravo [11].

Obr. 2-19 vlevo zobrazuje mapu tloušťky mazacího filmu pro konfiguraci (b). Experiment probíhal za podmínek čistého valení, aplikované zatížení činilo 5,4 N. Použité mazivo bylo stejného složení jako v předchozím měření. Obr. 2-19 vpravo zobrazuje mapu tloušťky mazacího filmu pro konfiguraci (c). Experiment probíhal za podmínek čistého skluzu, aplikované zatížení činilo 4,8 N. Použité mazivo bylo stejného složení jako v předchozích pokusech.



Obr. 2-19 Mapa tloušťky filmu pro konfiguraci (b) vlevo; mapa tloušťky filmu pro konfiguraci (c) vpravo [11].

První dvě vyšetřované konfigurace byly analyzovány z důvodu hlubšího poznání v oblasti I-EHL mazání. Třetí měřená konfigurace přímo demonstrovala reálnou aplikaci kontaktní oblasti vytvořené o-kroužkem a hřídelí. Autoři prezentovali LIF jako metodu vedoucí k získání mapy tloušťky filmu přes celý kontakt a byli schopni po vylepšení nastavení optiky měřit tloušťku filmu tenčí než 50 nm. Experimentální výsledky byly porovnávány s teoretickými predikcemi. Autoři uvedli, že přesnost výpočtových modelů je silně závislá na volbě kontaktních podmínek, zejména pak na tvaru samotné kontaktní oblasti.

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Zhodnocení poznatků získaných na základě rešerše

Pro měření tloušťky filmu v kontaktu jsou v dnešní době využívány různé experimentální metody. Na základě rešerše se jako vhodné jeví dvě metody, a to optická interferometrie a metoda fluorescenční mikroskopie. Možnosti analýz poddajných kontaktů jsou však stále velmi omezené. Zatímco u optické interferometrie byly při snaze studovat poddajné povrchy nanášeny povlaky na tuhá tělesa, tak u fluorescenční metody lze analyzovat přímo poddajná tělesa bez jakékoliv další úpravy jejich povrchu. Na základě této studie byla vybrána pro studium mazání v poddajném kontaktu metoda fluorescenční mikroskopie.

Základy pro pochopení měření tloušťky filmu pomocí fluorescenční metody byly poprvé položeny v 70. letech minulého století v publikacích [20, 27]. Zde se autoři zabývali měřením tloušťky filmu na volném povrchu a porovnávali možnosti použití rtuťové lampy a laseru jako excitačních zdrojů. Ukázali, že touto měřicí metodou lze zkoumat široký rozsah tlouštěk mazacích filmů. Mimo jiné ukázali i nevýhody metody, jako je např. vysvěcování barviva rozpuštěného v mazivu. Přestože autoři nezkoumali tloušťku filmu přímo v kontaktu dvou těles, jejich výzkum přinesl přínosný soubor dat pro studium hladovění kontaktu u valivých ložisek.

Reálnou aplikací měření tloušťky filmu se zabývali autoři Gabelli a Poll ve člancích [21, 22, 23]. Konkrétně se zaměřili na břitové těsnění, které je nejčastěji používaný těsnící prvek na hřídeli. Oproti předchozím publikacím autoři nejprve vytvořili matematický model popisující vývoj mazacího filmu mezi břitovým těsněním a hřídelí, který srovnávali s experimentálními výsledky. Oproti dříve použité metodě vyzdvihli výhodu fluorescenční metody v tom, že je možné měřit tloušťku filmu přes celý kontakt při měnících se silových a kinematických podmínkách. Nicméně kvůli použití skleněné hřídele, která má odlišné tribologické vlastnosti než ocelová, se dá očekávat jistá nepřesnost naměřených výsledků oproti reálné aplikaci.

Sugimura a kol. řešili v publikaci [28] dva problémy, které souvisely s interferencí světla a zkreslením pozadí. První problém se podařil vyřešit použitím skleněné čočky při kalibraci celého systému, druhý problém však nevyřešili. V příslušném článku měřili na konfiguraci skleněný disk/ hladká kulička a skleněný disk/ zdrsňená kulička. Právě u měření tloušťky filmu v kontaktu druhé varianty se ukázalo, že v průběhu testu docházelo ke změnám topografie povrchu kuličky a tím ke vzniku lokálního HD mazání.

K výraznému vylepšení metody přispěli autoři Hidrovo a Hart, kteří jako první přidávali do oleje dvě barviva a využívali jejich vzájemné ovlivnění excitačních a emisních vlnových délek. Tyto metody nazvané DELIF a ERLIF autoři popsali v publikacích [29, 30]. Snímky, které byly získány pomocí dvou kamer, byly vyhodnoceny na základě poměrného principu. Jedná se o poměrně složitý algoritmus. Jako jistou výhodou lze však vnímat velmi podrobný popis aplikovaného aparátu, který autoři v práci publikovali. Tímto postupem autoři docílili odstranění vnějších vlivů, jako je např. odrazivost materiálů kontaktních dvojic a především nerovnoměrná intenzita ozáření laserem napříč kontaktní oblastí. Ačkoliv se nemusí zdát tento přístup nikterak zásadně komplikovaný, nikomu jinému se prozatím nepodařilo využití principů DELIF, ERLIF reprodukovat, což svědčí o komplexnosti navrženého algoritmu.

Zajímavou aplikaci fluorescenční metody přinesl Reddyhoff a kol. [31]. Autoři se zaměřili na pozorování formování toku maziva. Dále na základě experimentů predikovali součinitele tření a třecí moment. Namísto kalibrace intenzity emisního záření na tloušťku filmu, zde bylo využito porovnání výsledků s optickou interferometrií. Bylo zjištěno, že intenzita fluorescence s tloušťkou filmu velmi úzce koreluje. Autoři v této práci dosáhli velmi dobré rozlišitelnosti okolo 200 nm.

S ohledem na splnění cílů této diplomové práce lze za dvě nejprínosnější práce považovat články publikované v roce 2010, respektive 2014. Tyto publikace vytvořila skupina Myanta [10] a kol., resp. Fowella a kol. [11]. Autoři v těchto článcích zkoumali poddajné kontakty třech konfigurací za různých silových a kinematických podmínek. Naměřené hodnoty při plně zaplaveném kontaktu a při hladovění kontaktu porovnávali s teoretickým předpokladem tloušťky mazacího filmu pro I-EHL režim mazání. Zjistili určité odchylky experimentálních dat od predikce, které odůvodnili vlastnostmi maziva a mírně se měnícími podmínkami při samotných experimentech. Dále přinesli velmi dobrou predikci počátku hladovění kontaktu a průběh poklesu dodávky maziva do kontaktu. Vhodnost a výhody použití měřicí metody indukované fluorescence jsou shrnuty v následujících bodech:

- Možnost měření tloušťky mazacího filmu v kontaktu poddajných těles.
- Není nutná povrchová úprava povrchu ani jednoho členu kontaktní dvojice - měření neodrazivých materiálů.
- Možnost pozorovat tok a formování maziva v kontaktu, mapování tloušťky maziva za měnících se silových, kinematických a teplotních podmínek.
- Měření a mapování tloušťky mazacího filmu pro celý kontakt.
- Měření tloušťky filmu nezávisle na drsnosti povrchů kontaktních dvojic.
- Měření velkého rozsahu tlouštěk filmu.

Na základě shrnutí literární rešerše lze konstatovat, že formování mazacího filmu v oblasti poddajných kontaktů nebylo dostatečně experimentálně popsáno. Téměř vůbec se také doposud publikované studie nezabývaly vlivem míry prokluzu mezi povrchy v relativním pohybu na vývoj tloušťky mazací vrstvy.

3.2 Cíl práce

3.2

Hlavním cílem diplomové práce je objasnit vliv kinematických podmínek na vývoj tloušťky mazacího filmu v poddajném kontaktu. Experimenty budou realizovány za podmínek čistého valení, částečného pozitivního a částečného negativního prokluzu.

Dílčí cíle

- Nalézt vhodný materiál, který umožní popsat mazací procesy v poddajném kontaktu (modul pružnosti zvoleného materiálu nesmí přesáhnout 1 GPa).
- Definovat experimentální podmínky, které se vyskytují v typických aplikacích poddajných kontaktů.
- Odladit algoritmus měřicí metody a porovnat výsledky s dosud publikovanými studiemi.
- Posoudit vliv kinematických podmínek na mazání kontaktu.

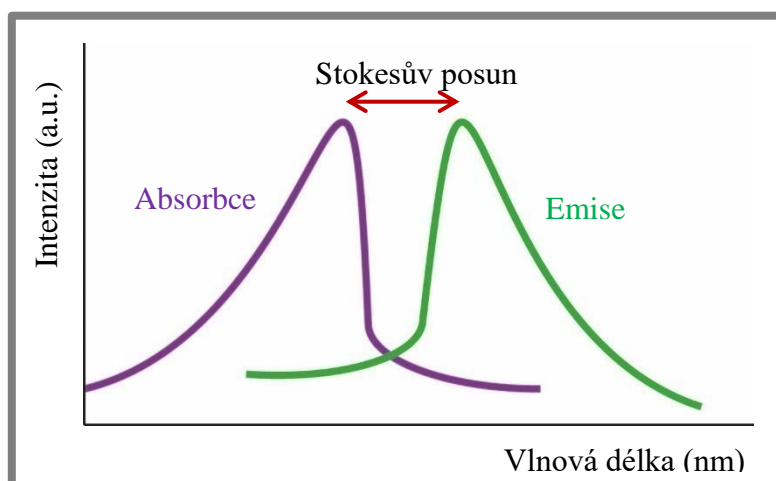
4 MATERIÁL A METODY

Plánovaná měření budou realizována při předem definovaných experimentálních podmínkách. Získání dat je založeno na principu empirické evidence. Následně bude aplikován proces indukce, kdy budou informace z modelové situace přenášeny na situaci reálnou.

4.1 Fluorescence

V práci je použita měřicí metoda založená na principu indukované fluorescence. Fluorescence je světelná emise látky, která je vystavena světelnému záření nebo jinému elektromagnetickému záření. Jedná se o druh fotoluminiscence, která se dělí na fosforescenci a fluorescenci. Hlavním rozdílem je doba emise látky. Fosforescence po odstranění světelného zdroje probíhá mnohem déle než u fluorescence, kde se doba emise pohybuje v rozmezí 10^{-9} až 10^{-6} s [1, 2]. Proces fluorescence lze popsat ve třech bodech dle [2]:

- Excitace: Foton o excitační vlnové délce vyzařovaný žhavicí lampou nebo laserem je absorbován fluoroforem obsaženým ve fluorescenčním barvivu.
- Excitovaný stav: Tento stav existuje po omezenou dobu (obvykle 1-10 ns). Během tohoto časového úseku dochází k částečné disipaci energie a může docházet k emisi záření.
- Emise: Vlivem disipace energie během excitovaného stavu má foton vyzařovaný barvivem nižší energii, a proto vyzařuje emisní záření o vyšší vlnové délce. Rozdíl mezi excitační a emisní vlnovou délkou se nazývá tzv. Stokesův posun (Obr. 4-1).

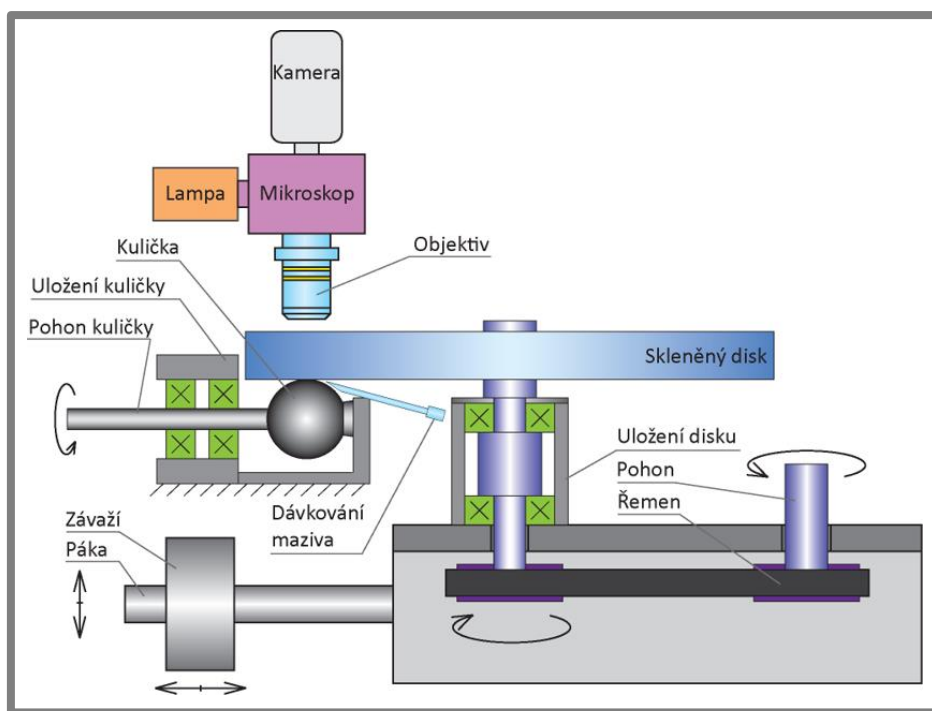


Obr. 4-1 Stokesův posun.

4.2 Experimentální aparatura

Schéma aparatury, která bude využita k experimentálním měřením, je znázorněna na Obr. 4-2. Tribometr simuluje kontakt nekonformních povrchů mezi kuličkou a diskem, které jsou poháněny nezávisle na sobě, díky čemuž lze aplikovat různé

kinematické podmínky (různé rychlosti a různý stupeň prokluzu - SRR). Jako excitační zdroj je použita rtuťová lampa vyzařující bílé světlo. Před fluorescenční lampou se nachází otočný karusel se šesti sloty pro sestavy různých kombinací příslušných excitačních a emisních filtrů. Pro měření je v této diplomové práci použit filtr s excitační vlnovou délkou v rozsahu od 535 do 555 nm, emisní vlnovou délkou v rozmezí od 573 do 638 nm a dichroickým zrcátkem. Zatěžování kontaktu probíhá přes pákový mechanismus. Snímání kontaktu je zajištěno přes sCMOS vysoko-rychlostní kameru



Obr. 4-2 Schéma měřicí aparatury využívané v diplomové práci [34].

4.3 Metodika a podmínky měření

4.3

Metodika měření centrální tloušťky maziva v poddajném kontaktu spočívá v použití alespoň jednoho kontaktního tělesa s modulem pružnosti nepřesahující 1 GPa. Na Obr. 4-2 lze vidět, že tribologický kontakt je tvořen elastomerovou kuličkou, která je přitlačena ke skleněnému disku z optického skla. Skleněný disk má Youngův modul pružnosti 80 GPa a Poissonův poměr 0,209. Testovací poddajná kulička je uchycena sevřením mezi čelistmi, které jsou uloženy ve valivých ložiscích. Vzorek je vyroben z materiálu nitrile butadiene rubber (NBR) a má průměr 25,4 mm. Výrobce (REDHILL PRECISION SPECIALTY BALLS Inc.) uvádí Youngův modul pružnosti kuličky 3,5 MPa a Poissonův poměr 0,48 – 0,49. Tento materiál se běžně využívá například při výrobě břitových těsnění a o-kroužků.

Díky nezávislému pohonu kuličky a disku mohou být experimenty prováděny za podmínek čistého valení, částečného pozitivního a částečného negativního prokluzu kontaktní dvojice. Rozsah uvažovaných středních rychlostí se pohybuje v rozmezí od 10 do 400 mm/s. Tyto podmínky jsou zvoleny na základě možností použité aparatury a simulují podmínky v běžných inženýrských aplikacích, jako jsou hřídelová těsnění používaná v motorových převodovkách a v dalších oblastech, kde je třeba zamezit výtoku oleje z mazaného prostředí.

Pro experimentální měření byla použita celkem tři maziva. První olej, který byl využit pro ověření funkčnosti algoritmu vyhodnocení na keramickém vzorku a kuličce z fenolové pryskyřice, je Glycerol (FLUKA) o dynamické viskozitě 0,89 Pa·s, ve kterém bylo rozpuštěno 0,03 hm% fluorescenčního barviva Rhodamine 6G. Druhým mazivem, které bylo použito pro experimentální měření poddajného kontaktu, byl opět Glycerol (SIGMA-ALDRICH) o dynamické viskozitě 0,8 Pa·s, do kterého bylo přidáno fluorescenční barvivo Rhodamine 6G v koncentraci 0,03 hm%. Třetí olej, využitý opět při analýze mazání poddajného kontaktu, byl Polyglycol 460 (FUCHS) o dynamické viskozitě 1 Pa·s. V tomto případě bylo barvivo Rhodamine 6G rozpuštěno v koncentraci 0,01 hm%. V dříve uvedených publikacích bylo zjištěno, že koncentrace 0,01 hm% rozpuštěného barviva nemá žádný vliv na viskozitu základního maziva. Mazání probíhá samovolným vnášením maziva do kontaktu, ke kterému dochází v důsledku rotace kuličky, která se brodí v nádrži s mazivem. V případě pozitivních prokluzů, kdy dochází k postupnému zvyšování otáček disku při současném snižování otáček kuličky, je mazivo přiváděno do kontaktu pomocí přidavného dávkovacího zařízení.

Před každým experimentem je celé zařízení vyčištěno od případných nečistot. Kulička je uchycena do přípravku a je doplněno mazivo a aplikováno požadované zatížení. Zařízení je poté po určitou dobu spuštěno pro ustálení podmínek v kontaktu.

Při experimentálním měření je prvním snímkem statický kontakt. Další snímky jsou pořizovány v sérii různých unášivých rychlostí. Navíc je pořízen snímek pozadí, tzv. normalizační snímek, který může být použit k eliminaci nehomogenity intenzity osvětlení rtuťové lampy. Samotná kalibrace poté spočívá v aplikaci Hertzovy teorie. Pomocí rovnice (1) je učena teoretická tloušťka filmu na základě vzdálenosti od středu kontaktu. Na základě této rovnice je tak dané intenzitě přiřazena konkrétní tloušťka mazacího filmu.

$$h = \frac{a \cdot p_{max}}{E'} \cdot \left[- \left(2 - \frac{r^2}{a^2} \right) \cdot \cos^{-1} \frac{a}{r} + \left(\frac{r^2}{a^2} - 1 \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (1)$$

kde:

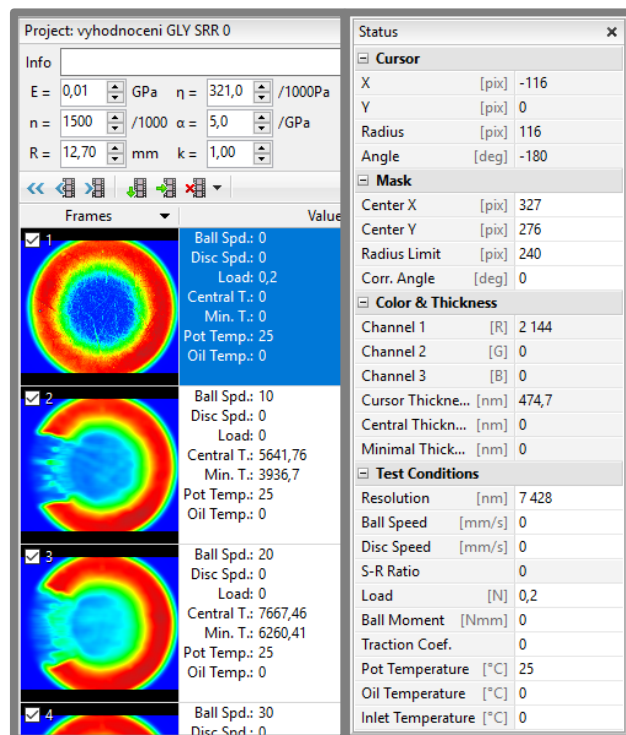
h	m	je velikost mezery v závislosti na vzdálenosti od středu kontaktu
a	m	- poloměr centrální oblasti
p_{max}	Pa	- maximální kontaktní tlak
r	m	- vzdálenost od středu statického kontaktu

4.4 Algoritmus vyhodnocení tloušťky filmu

Pro vyhodnocení tloušťky mazacího filmu map intenzity fluorescence v kontaktní oblasti bylo vytvořeno rozhraní v softwaru AChILES. Část naměřených dat v této diplomové práci sloužila jako vstupní parametry pro vytvoření a ověření jeho funkčnosti. Toto rozhraní bylo vytvořeno externím programátorem. Vyhodnocení spočívá v importu snímků za různých kinematických podmínek, kde jsou výstupem zpracovaných dat mapy tloušťek filmu. Dále je možné vykreslovat horizontální a vertikální profily tloušťky filmu středem kontaktu. Uživatelské prostředí se skládá z panelů, potřebných k vyplnění informací pro vyhodnocení experimentu.

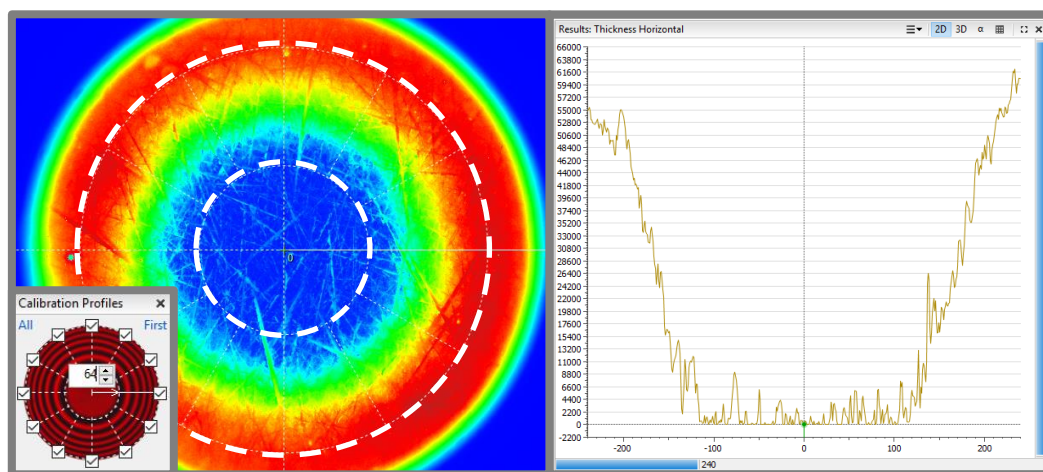
Snímky kontaktů jsou importovány ve formátu tif a jsou zobrazovány v panelu na Obr. 4-3 vlevo. Pokud uživatel změní obrázek (velikost, aplikování filtru atd.), je nutné v panelu vlevo uložit danou změnu tlačítkem Replace Frame, dále se v tomto panelu vyplňuje redukovaný modul pružnosti kontaktní dvojice. Na Obr. 4-3 vpravo je zobrazen panel, který je rozdělen do čtyř částí. První záložka ukazuje aktuální

polohu kurzoru na obrázku, další část umožňuje umístění osového kříže do středu kontaktu, třetí záložka vypisuje tloušťky filmu (centrální, minimální a aktuální tloušťku kurzoru na snímku). V poslední části se vyplňuje velikost jednoho pixelu na obrázku kontaktu a dané zatížení na kalibračním snímku (statický kontakt).



Obr. 4-3 Panel s nahranými snímky vlevo; panel s výpisem tlouštěk filmu vpravo.

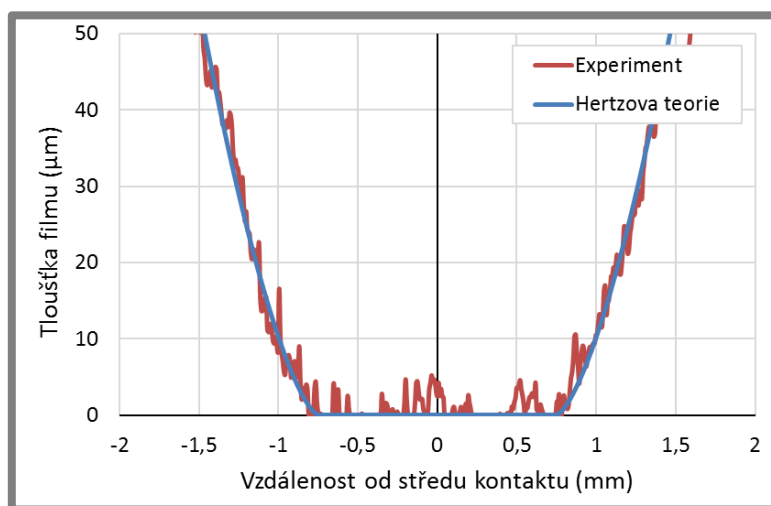
Na Obr. 4-4 vlevo je znázorněn statický kontakt v zobrazovací oblasti programu. V tomto snímku je osový kříž umístěn do středu kontaktu. Pomocí okna vlevo dole je určena velikost kontaktní oblasti v pixelech (vnitřní kružnice osového kříže). Dále je učena oblast, ve které je provedena kalibrace (mezikruží mezi vnitřní a vnější kružnicí), kde ke každé intenzitě fluorescence je po spuštění přiřazena určitá tloušťka



Obr. 4-4 Statický kontakt v zobrazovací oblasti softwaru vlevo; vykreslení tloušťky filmu v závislosti na vzdálenosti od středu kontaktu vpravo.

filmu na základě Hertzovy teorie. Okno pro vykreslení profilů tloušťky filmu v závislosti na vzdálenosti od středu kontaktu v horizontálním nebo vertikálním směru je zobrazeno na Obr. 4-4 vpravo. Tento panel slouží zároveň pro určení středu kontaktu přepnutím v horní části okna. Dále je zde možné přepnutí do 3D profilu kontaktu.

Pro každou experimentální sadu měření byl profil tloušťky filmu pro statický kontakt srovnán s Hertzovou teorií a tím ověřena správnost přiřazení určité tloušťky filmu k určité intenzitě fluorescence. Toto srovnání pro určitý experiment je na Obr. 4-5.



Obr. 4-5 Srovnání statického kontaktu po kalibraci s Hertzovou teorií.

5 VÝSLEDKY

5

Diplomová práce se zabývá odladěním metody fluorescenční mikroskopie pro analýzu mazání poddajných kontaktů. Hlavní pozornost je pak věnována vlivu kinematických podmínek na vývoj tloušťky mazacího filmu.

Výsledky diplomové práce jsou rozděleny do dvou částí. Nejdříve bylo nutné nalézt vhodný poddajný materiál, fluorescenční barvivo, mazivo a sestavu filtrů pro splnění hlavního cíle práce. Druhou částí jsou samotné experimenty na základě provedené analýzy vhodných materiálů a srovnání naměřené centrální tloušťky s teoretickou predikcí I-EHL. Pro predikci centrální tloušťky (h_c) filmu jsou použity rovnice (2-4) dle Hamrocka a kol. [35] a rovnice (5-7) dle Nijenbanninga a kol. [36]:

$$h_c^H = 7,32 \cdot (1 - 0,72 \cdot e^{-0,28 \cdot k}) \cdot \bar{U}^{0,64} \cdot \bar{W}^{-0,22} \cdot R'_x \quad (2)$$

$$\bar{U} = \frac{u \cdot \eta}{E' \cdot R'_x} \quad (3)$$

$$\bar{W} = \frac{w}{E' \cdot R'_x{}^2} \quad (4)$$

kde:

h_c^H	m	- centrální tloušťka filmu dle Hamrocka a kol.
k	1	- parametr elipticity
\bar{U}	1	- bezrozměrný parametr rychlosti
\bar{W}	1	- bezrozměrný parametr zatížení
u	m/s	- unášivá rychlost
w	N	- aplikované zatížení
η	Pa·s	- dynamická viskozita maziva
E'	Pa	- redukovaný modul pružnosti
R'_x	m	- redukovaný poloměr ve směru unášivé rychlosti

$$h_c^N = C_{cen}^{EI} \cdot (D) \cdot M^{-\frac{2}{5}} \cdot R'_x / (E' \cdot R'_x / \eta \cdot u)^{-1/2} \quad (5)$$

$$C_{cen}^{EI} = 3,18 \cdot (1 + 0,006 \cdot \ln D + 0,63 \cdot D^{4/7})^{-14/25} \cdot D^{-1/15} \quad (6)$$

$$M = \bar{W} \cdot \bar{U}^{-3/4} \quad (7)$$

kde:

h_c^N	m	- centrální tloušťka filmu dle Nijenbanninga a kol.
D	1	- poměr $R'_x/R'_y = 1$ pro kruhový kontakt
M	1	- bezrozměrný Moesův parametr zatížení

5.1 Analýza použitých materiálů

5.1

V následující kapitole jsou popsány postupy při výběru vhodných materiálů pro splnění cílů práce. Jedná se o výběr vhodné kombinace maziva a fluorescenčního barviva, dále excitačního a emisního filtru, a kuličky z poddajného materiálu. U zvolené kombinace je třeba zabránit nežádoucím jevům, jako je např. jiná excitační

a emisní vlnová délka barviva v závislosti na tom, v jakém mazivu je fluorescenční barvivo rozpuštěno.

5.1.1 Měření intenzity fluorescence

Samotnému pozorování tloušťky filmu v poddajném kontaktu předcházela analýza použití vhodných maziv, fluorescenčních barviv a filtrů. Na základě toho je vytvořena matice měření pro kombinaci celkem čtyř olejů, čtyř barviv a čtyř filtrů. Je pozorována hodnota intenzity fluorescence, rozpustnost jednotlivých barviv v určitém oleji, a zda nedochází během experimentu k vysrážení barviva.

Použitá maziva:

- Spectrasyn 6 ($\eta = 0,0458$ Pas)
- R553/73 ($\eta = 0,5122$ Pas)
- Glycerol ($\eta = 1,16$ Pas)
- BS ($\eta = 0,78$ Pas)

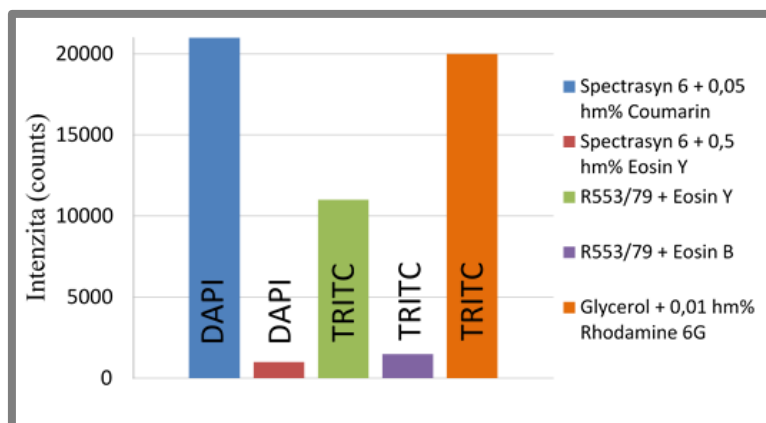
Použitá fluorescenční barviva:

- Coumarin (voda: $\lambda_{\text{ex}} = 387$ nm, $\lambda_{\text{em}} = 470$ nm)
- Rhodamine 6G (voda: $\lambda_{\text{ex}} = 525 - 550$ nm, $\lambda_{\text{em}} = 530 - 620$ nm)
- Eosin B ($\lambda_{\text{ex}} = 509 - 524$ nm, $\lambda_{\text{em}} = 540 - 550$ nm)
- Eosin Y ($\lambda_{\text{ex}} = 490$ nm, $\lambda_{\text{em}} = 542$ nm)

Použité filtry:

- DAPI ($\lambda_{\text{ex}} = 330 - 372$ nm, $\lambda_{\text{em}} = 438 - 483$ nm)
- FITC ($\lambda_{\text{ex}} = 460$ nm, $\lambda_{\text{em}} = 498$ nm)
- TRITC ($\lambda_{\text{ex}} = 532 - 554$ nm, $\lambda_{\text{em}} = 570 - 613$ nm)
- EOSIN ($\lambda_{\text{ex}} = 480 - 518$ nm, $\lambda_{\text{em}} = 536 - 581$ nm)

Intenzita emise fluorescenčního barviva je zaznamenávána pomocí sCMOS vysokorychlostní kamery jako 16 bitový obraz, což znamená, že může být pozorováno maximálně $2^{16} = 65\,536$ stupňů šedi, které jsou dále uváděny jako intenzita fluorescence. Na Obr. 5-1 jsou příklady intenzit vybraných kombinací, kde na základě těchto výsledků bylo vybráno mazivo Glycerol s barvivem Rhodamine 6G, které se v mazivu rozpouští v řádech jednotek minut a jako jediné z testovaných barviv vykazuje už při nízkých koncentracích (setiny hm%) intenzitu okolo 20 000. Během experimentů nedochází k jeho vysrážení. V průběhu dalších analýz bylo zjištěno, že dostatečnou míru emise lze pozorovat i v případě použití maziva Polyglycol, ve kterém se rozpouštělo maximálně 0,01 hm% fluorescenčního barviva Rhodamine 6G.



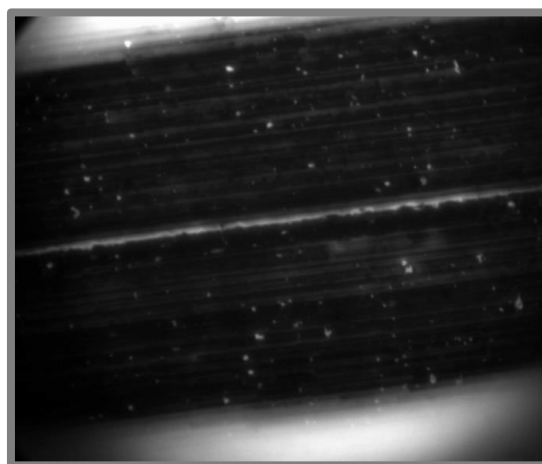
Obr. 5-1 Naměřené intenzity fluorescence pro vybrané kombinace maziv, fluorescenčních barviv a filtrů.

Pro objasnění vlivu hygroskopie bylo v případě glycerolu (FLUKA) provedeno měření viskozity před a po sérii experimentů. Měření bylo realizováno s využitím kapilárního viskozimetru typu III. Naměřená dynamická viskozita maziva s rozpuštěnými 0,03 hm% barviva před experimenty činila cca 0,95 Pa·s a viskozita po 36 hodinách 0,89 Pa·s.

5.1.2 Výběr vhodného poddajného materiálu

S ohledem na použitou experimentální aparaturu a zkoumání kontaktu za různých kinematických podmínek, zejména SRR, byla tělesem z poddajného materiálu kulička. Výběr vhodného vzorku spočíval v analýze materiálů, které se běžně používají k výrobě o-kroužků či břitových těsnění. Jednalo se o materiály Viton, červený a bílý silikon, NBR, FKM a EPDM.

Samotný výběr vhodného materiálu probíhal na o-kroužcích. Pro každý materiál byl pořízen statický snímek kontaktu o-kroužek/skleněný disk, přičemž u naprosté většiny snímků pryžových materiálů byly pozorovány tzv. artefakty. Jsou to nežádoucí světelné jevy, které významným způsobem ovlivňují samotnou fluorescenci a mohly by způsobit nepřesnosti v měření tloušťky filmu a v pozorování formování maziva. Snímek statického kontaktu skleněného disku a o-kroužku z materiálu s označením EPDM je na Obr. 5-2.



Obr. 5-2 Artefakty materiálu EPDM.

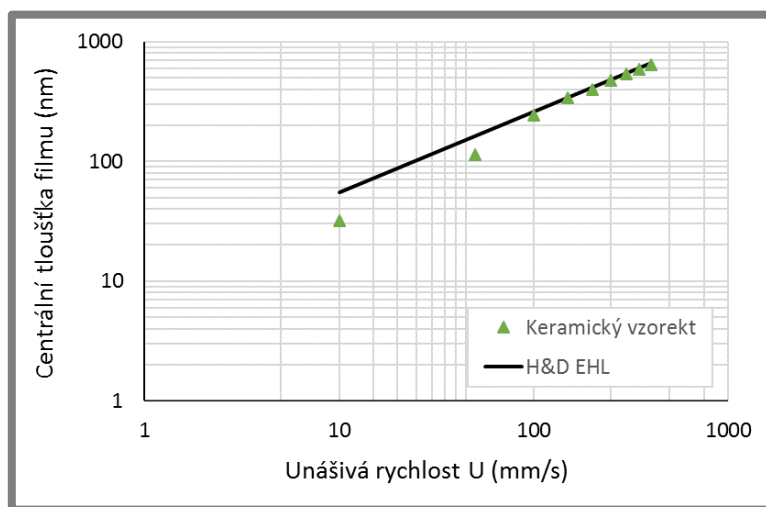
Jediným z testovaných vzorků, který nevykazoval žádné artefakty, je o-kroužek z materiálu s označením NBR o Shore A tvrdosti 70. Proto je pro následující experimentální měření použita kulička z tohoto materiálu o průměru 25 mm od výrobce REDHILL PRECISION SPECIALTY BALLS Inc.

5.2 Experimentální měření tloušťky filmu v tuhém kontaktu

Pro vytvoření vyhodnocovacího softwaru a následné ověření jeho funkčnosti byly nejprve provedeny experimenty pro tuhý kontakt. Toto měření spočívalo v použití keramické kuličky s modulem pružnosti v řádu stovek GPa. Následně byla použita kulička z fenolové pryskyřice s modulem pružnosti v řádu jednotek GPa, která představuje určitý přechod mezi tuhým a poddajným kontaktem. Naměřená data byla vyhodnocena a porovnána s teoretickou predikcí pro tuhé kontakty definovanou v literatuře Hamrock a Dowson [37].

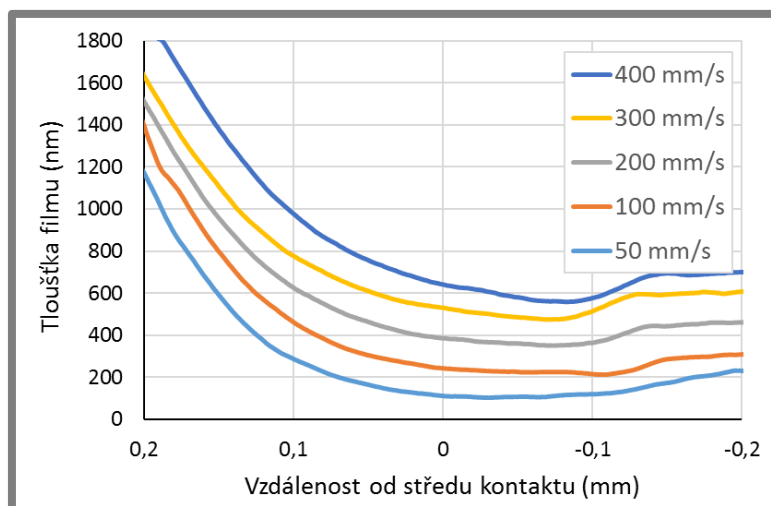
5.2.1 Keramický vzorek

Použitá keramická kulička má modul pružnosti 310 GPa a Poissonův poměr 0,27. Experimenty probíhaly za čistého valení při různých unášivých rychlostech v rozmezí od 10 mm/s do 400 mm/s. Zatížení činilo 8 N. Na Obr. 5-3 je vykreslena naměřená centrální tloušťka v závislosti na unášivé rychlosti v logaritmických souřadnicích. Naměřená data jsou srovnána s teoretickou predikcí pro naměřenou dynamickou viskozitu oleje s rozpuštěným mazivem, která činí 0,89 Pa·s. Z naměřených centrálních tloušťek vyplývá velmi dobrá shoda s teoretickou predikcí dle Hamrocka a Dawsona při rychlostech vyšších než 100 mm/s.



Obr. 5-3 Naměřená centrální tloušťka filmu pro keramický vzorek.

Na Obr. 5-4 jsou vykresleny profily tloušťky filmu středem kontaktu pro různé unášivé rychlosti. Vstup do kontaktu je vlevo. Na výstupu z kontaktu nedochází k výraznému snížení tloušťky filmu. Při nižších rychlostech do 100 mm/s se minimální tloušťka filmu nachází v centrální části kontaktu. Se zvyšující se rychlostí dochází k rovnoměrnému nárůstu tloušťky filmu v kontaktu.

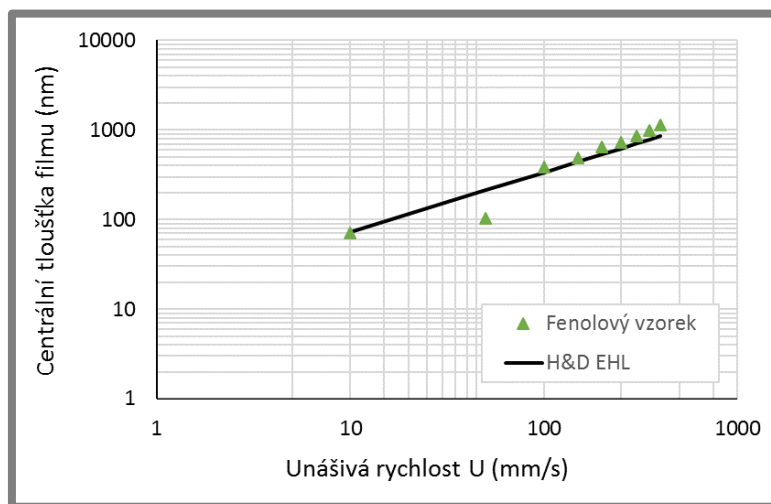


Obr. 5-4 Vykreslení profilů tloušťky filmu středem kontaktu ve směru unášivé rychlosti pro keramický vzorek, vstup do kontaktu je vlevo.

5.2.2 Vzorek z fenolové pryskyřice

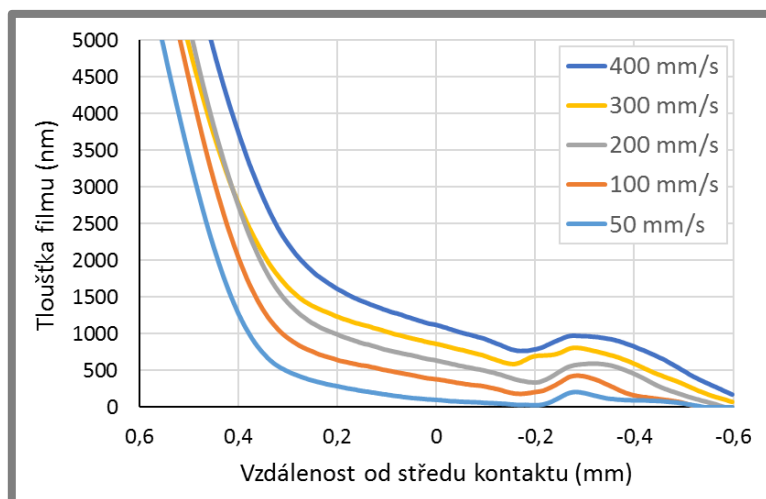
Pro přechod mezi čistě tuhými a poddajnými kontakty bylo provedeno měření pro kuličku z fenolové pryskyřice, která má modul pružnosti 4,1 GPa a Poissonův poměr 0,27. Experimenty byly realizovány za čistého valení při rychlostech od 10 mm/s do 400 mm/s. Kontakt byl zatěžován silou 8 N. Na Obr. 5-5 je zobrazena centrální tloušťka filmu v závislosti na valivé rychlosti v logaritmických souřadnicích. Naměřená data vykazují lineární nárůst, který je však oproti teorii strmější. Od rychlosti 200 mm/s se naměřené hodnoty pohybovaly nad predikcí.

5.2.2



Obr. 5-5 Centrální tloušťka filmu pro vzorek z fenolové pryskyřice pro různé unášivé rychlosti.

Na Obr. 5-6 jsou vykresleny profily tloušťky filmu při různých rychlostech v závislosti na vzdálenosti od středu kontaktu. Vstup do kontaktu je vlevo. Na výstupu kontaktu lze pozorovat snížení tloušťky filmu. Se zvyšující se rychlostí dochází k rovnoměrnému narůstání tloušťky filmu a lze pozorovat formování hydrodynamického klínu.



Obr. 5-6 Profily tloušťky filmu ve směru unášivé rychlosti středem kontaktu pro vzorek z fenolové pryskyřice; vstup do kontaktu je vlevo.

5.3 Experimentální studium tloušťky filmu v poddajném kontaktu

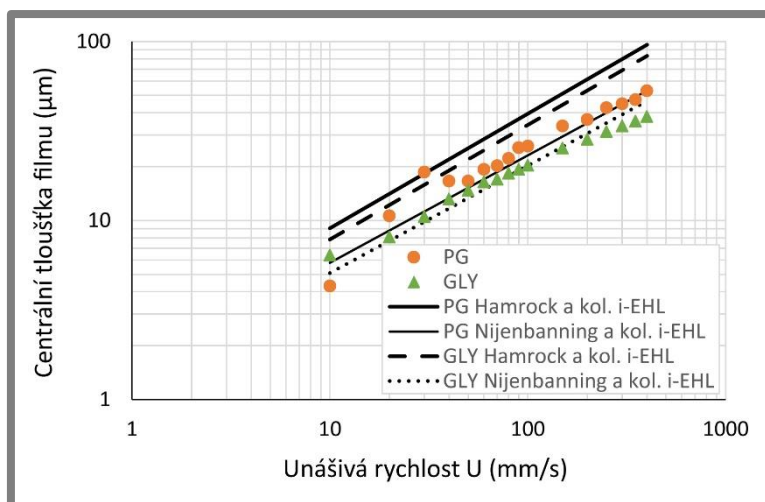
V následující kapitole jsou popsány experimenty zaměřené na formování mazacího filmu v poddajném kontaktu za různých kinematických podmínek. Jako mazivo je použit Glycerol (GLY) o dynamické viskozitě 0,8 Pa·s (SIGMA-ALDRICH) a Polyglycol 460 (PG) o dynamické viskozitě 1 Pa·s (FUCHS). Na základě cílů práce definovaných v kapitole 3.2 jsou realizována měření za různých středních rychlostí při čistém valení a různých stupních prokluzu při snaze detailně popsat formování mazacího filmu v závislosti na kinematických podmínkách. Pro ověření naměřených dat byly experimenty při určitých kinematických podmínkách zopakovány.

Studium utváření mazacího filmu v poddajném kontaktu NBR kuličky a skleněného disku probíhalo při konstantním zatížení 0,2 N. Jednotlivé sady měření byly vytvořeny pro čisté valení, částečný negativní a částečný pozitivní prokluz. V experimentech byl použit blok filtrů s označením TRITC a objektiv s pětinasobným zvětšením. Z důvodu velké kontaktní oblasti byl použit optický prvek redukující zvětšení na 3,5x.

5.3.1 Čisté valení

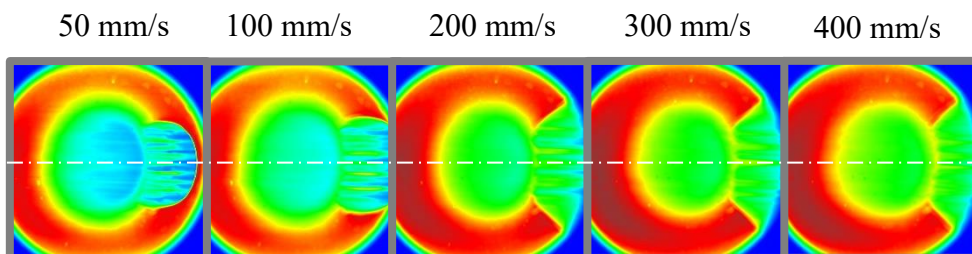
Na Obr. 5-7 jsou vykresleny hodnoty centrální tloušťky filmu v závislosti na unášivé rychlosti pro obě maziva. Z výsledků plyne, že naměřené hodnoty za nižších rychlostí vykazují lineární charakter se stejným sklonem jako teoretická predikce. Pro Glycerol od rychlosti 150 mm/s do 400 mm/s dochází k mírnému snížení sklonu naměřených hodnot. U PG tato změna není patrná. Především u PG vykazovaly tloušťky naměřené při rychlostech menších než 70 mm/s značný rozptyl. Zjištěná tloušťka ve středu kontaktu pro oba oleje je však přes celý rychlostní interval menší než teoretická predikce pro I-EHL dle Hamrocka a kol. [35]. Naopak při srovnání s teorií dle Nijenbanninga a kol. [36] jsou naměřené hodnoty při nižších rychlostech pro PG mírně nad predikcí, avšak při vyšších rychlostech byla pozorována velmi dobrá shoda s teoretickými hodnotami. Mazivo GLY do rychlosti 150 mm/s odpovídá právě predikci podle [36], kde u vyšších rychlostí došlo k částečnému odklonu naměřených

dat. Rozsah naměřených tloušťek pro PG se pohyboval od 4,3 do 53,2 μm , pro GLY od 6,4 do 38 μm .



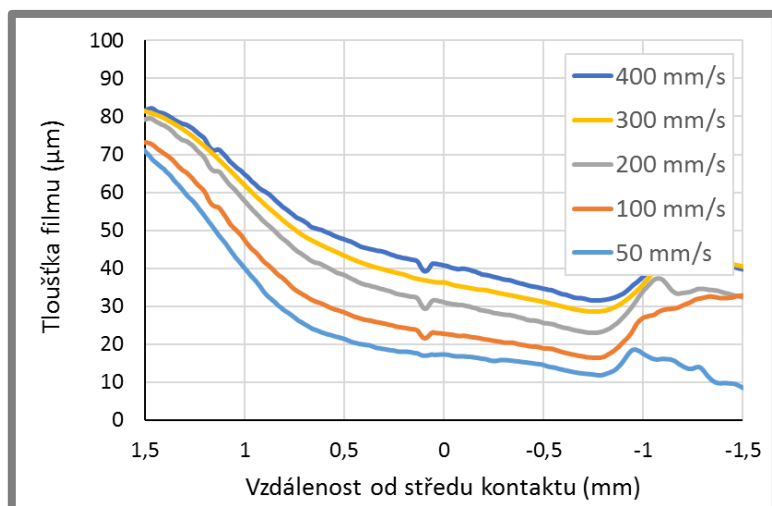
Obr. 5-7 Hodnoty centrální tloušťky filmu pro NBR vzorek v závislosti na rychlosti pro $SRR = 0$.

Obr. 5-8 ukazuje mapy tloušťky filmu v kontaktu pro různé unášivé rychlosti pro mazivo GLY. Jednotlivé snímky mají rozlišení 2160x2160 pixelů. Vstup do kontaktu je vždy vlevo. Typickou konstrikci tloušťky filmu ve tvaru podkovy na výstupu z kontaktu lze pozorovat přibližně od rychlosti 50 mm/s do 200 mm/s, ale při vyšších rychlostech už nebyla zcela patrná.



Obr. 5-8 Mapy tloušťky filmu v závislosti na unášivé rychlosti pro čisté valení NBR kuličky po skleněném disku; zatížení kontaktu činí 0,2 N; použité mazivo je GLY; vstup do kontaktu je vždy vlevo; snímky jsou 3,8 x 3,8 mm velké.

Na Obr. 5-9 jsou zobrazeny naměřené profily tloušťky filmu podél osy z dat naměřených na Obr. 5-8. Se zvyšující se střední rychlostí lze pozorovat utváření klínu, jehož sklon postupně narůstá a tím dochází k rovnoměrnému narůstání centrální tloušťky filmu. Je zde patrné také snížení tloušťky maziva na výstupu z kontaktu. Od rychlosti 300 mm/s dochází k jeho mírnému posunu ve směru unášivé rychlosti. Stejné chování poddajného kontaktu bylo pozorováno také v práci od Fowell a kol. [11].

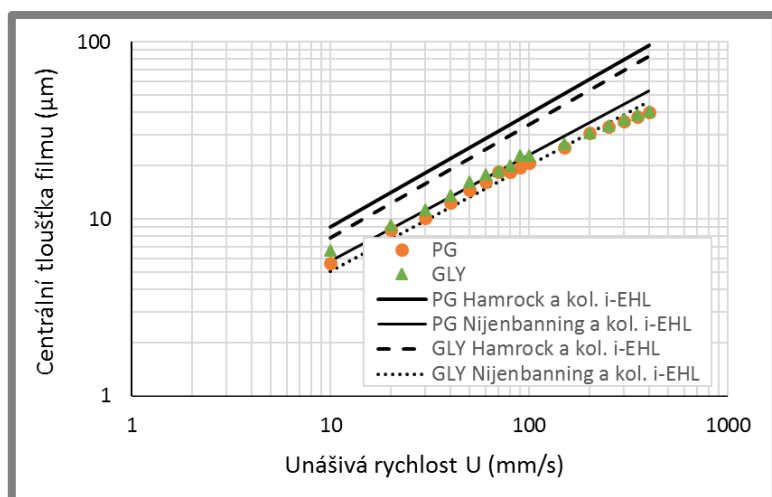


Obr. 5-9 Vykreslené profily tloušťky filmu v závislosti na vzdálenosti od středu kontaktu z naměřených dat na Obr. 5-6; vstup do kontaktu je vlevo.

5.3.2 Negativní prokluz

Pozorování utváření mazacího filmu za podmínek částečného negativního prokluzu bylo realizováno při hodnotách $SRR = -0,4, -0,8, -1,2, -1,6$. Uvažován byl rovněž čistý negativní prokluz ($SRR = -2$).

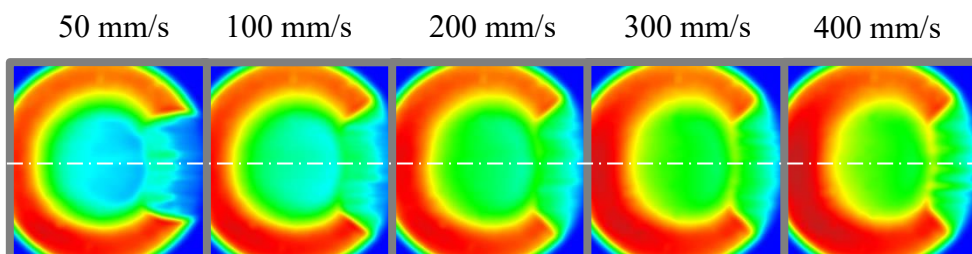
Centrální tloušťka filmu pro obě maziva při $SRR = -0,4$ je zaznamenána na Obr. 5-10. Po změně stupně prokluzu došlo k mírnému nárůstu tloušťky při použití GLY a naopak k poklesu tloušťky při použití PG. Při nižších rychlostech se naměřené hodnoty pro PG velmi dobře shodují s teoretickou predikcí pro GLY podle [36] a naopak. Při vyšších rychlostech došlo k vzájemnému překrytí tlouštěk filmu. Naměřené hodnoty pod rychlostí 80 mm/s vykazovaly větší rozptýl, poté došlo k jejich ustálení. Nejvyšší naměřená tloušťka filmu pro obě maziva činila přibližně 40,5 μm .



Obr. 5-10 Hodnoty centrální tloušťky filmu pro NBR vzorek v závislosti na rychlosti při $SRR = -0,4$.

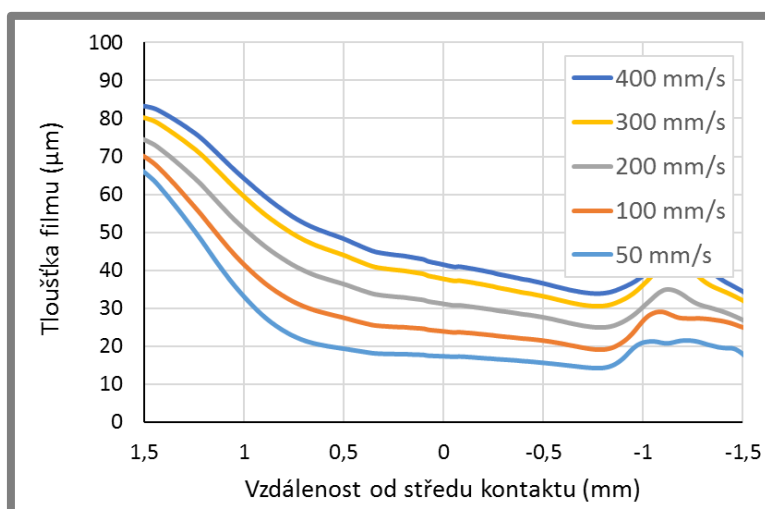
Na Obr. 5-11 jsou znázorněny snímky kontaktu pro vybrané unášivé rychlosti pro mazivo GLY. Oproti předchozím snímkům by se mohlo zdát, že došlo ke zvětšení

kontaktní oblasti, ale to je způsobeno nižší intenzitou osvětlení kontaktu, a tím pádem menší fluorescenční emisí použitého barviva. Mezi každou sadou měření může být rozložení světelného paprsku upravováno, tudíž může být pro každý experiment odlišné.



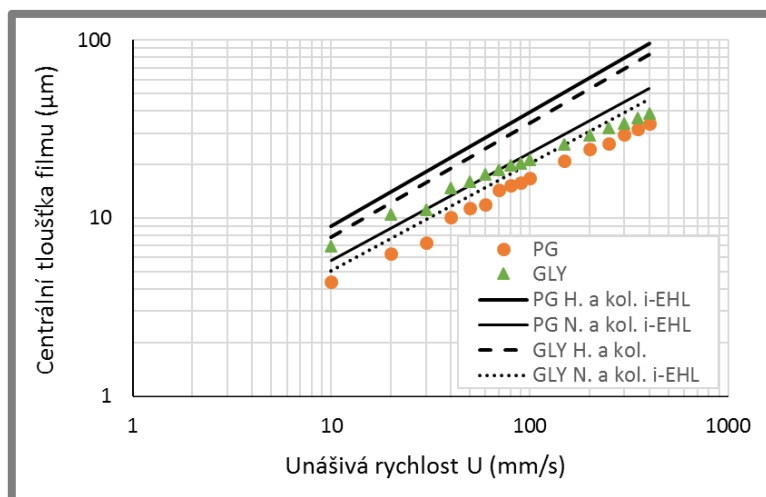
Obr. 5-11 Mapy tloušťky filmu v závislosti na unášivé rychlosti; $SRR = -0,4$; zatížení kontaktu činí $0,2\text{ N}$; použité mazivo je GLY; vstup do kontaktu je vždy vlevo; snímky jsou $3,8 \times 3,8\text{ mm}$ velké.

Profily tloušťky filmu podél osy vyznačené na Obr. 5-11 jsou vykresleny na Obr. 5-12. Stejně jako u čistého valení lze pozorovat postupný nárůst sklonu hydrodynamického klínu se zvyšující se unášivou rychlostí. Mezi jednotlivými rychlostmi dochází k rovnoměrnému nárůstu tloušťky filmu, s výjimkou rychlosti 400 mm/s , kde je oproti ostatním tento nárůst přibližně poloviční.



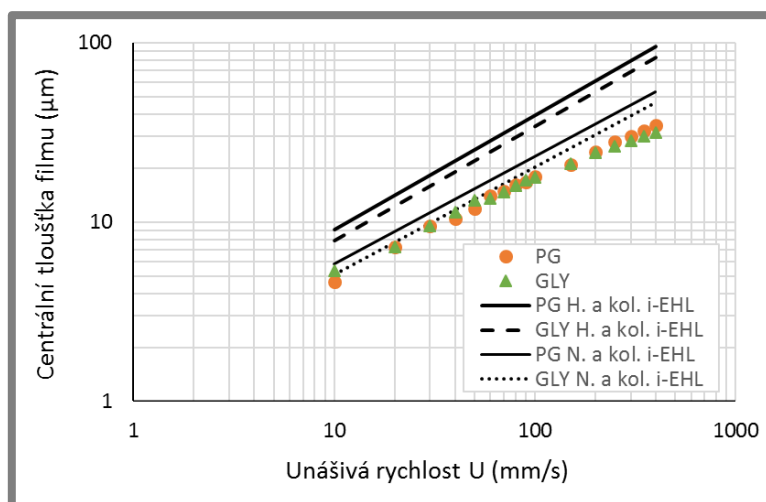
Obr. 5-12 Vykreslené profily tloušťky filmu v závislosti na vzdálenosti od středu kontaktu z naměřených dat na Obr. 5-11; vstup do kontaktu je vlevo.

Při $SRR = -0,8$ se zjištěné tloušťky filmu pro PG nacházely v celém intervalu studovaných rychlostí pod hodnotami maziva GLY, i když by to teoreticky mělo být naopak. Výsledky tohoto experimentálního měření jsou vykresleny na Obr. 5-13. Při srovnání obou maziv dochází s rostoucí unášivou rychlostí k postupnému přibližování naměřených centrálních tlouštěk filmu. Rozsah zjištěných hodnot se pohyboval pro GLY od $6,9$ do $38,5\text{ }\mu\text{m}$ a pro PG od $4,4$ do $34\text{ }\mu\text{m}$.



Obr. 5-13 Hodnoty centrální tloušťky filmu pro NBR vzorek v závislosti na rychlosti při $\text{SRR} = -0,8$.

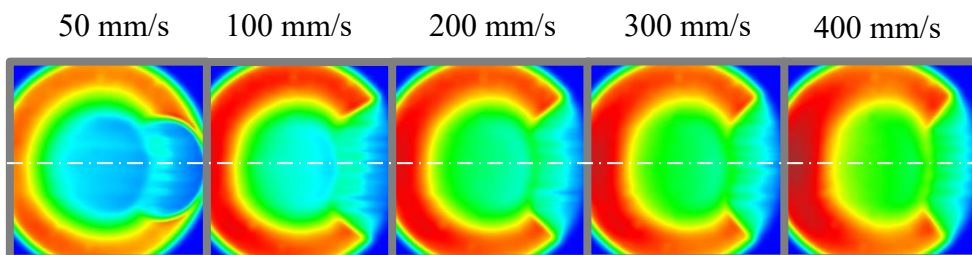
Tloušťka filmu ve středu kontaktu pro $\text{SRR} = -1,2$ je zaznamenána na Obr. 5-14. Naměřené centrální tloušťky filmu pro obě maziva vykazují shodné výsledky v průběhu celého rozsahu aplikovaných rychlostí. Příčinou tohoto překrytí byl výrazný pokles tlouštěk pro GLY. Od rychlosti 250 mm/s byly pozorovány větší tloušťky filmu u maziva PG pouze v řádu jednotek mikrometrů. Naměřené hodnoty pro obě maziva vykazují lineární průběh pod stejným sklonem jako teoretická křivka. V tomto experimentálním měření byly všechny zjištěné tloušťky filmu pod teoretickou predikcí dle Hamrocka a kol. [35] a také mírně pod teorií dle Nijenhanninga a kol. [36]. Nejvyšší naměřená centrální tloušťka byla pro PG 34,6 μm a pro GLY 31,6 μm .



Obr. 5-14 Hodnoty centrální tloušťky filmu pro NBR vzorek v závislosti na rychlosti při $\text{SRR} = -1,2$.

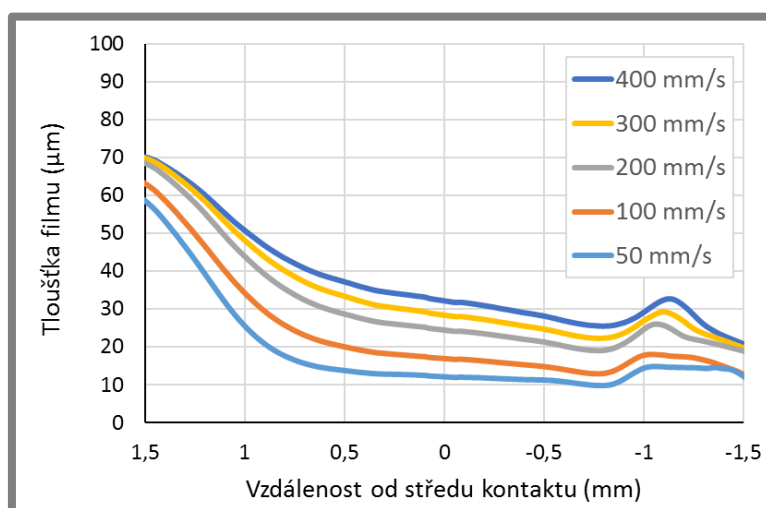
Utváření mazacího filmu v kontaktu pro mazivo GLY je vyobrazeno na Obr. 5-15. V tomto případě bylo možné pozorovat pokles tloušťky filmu na výstupu z kontaktu v rozmezí středních rychlostí od 80 do 300 mm/s . Se zvyšující se rychlostí

byla pozorována deformace z kruhové kontaktní oblasti na elipsovitou, kde k této změně docházelo ve směru unášivé rychlosti.



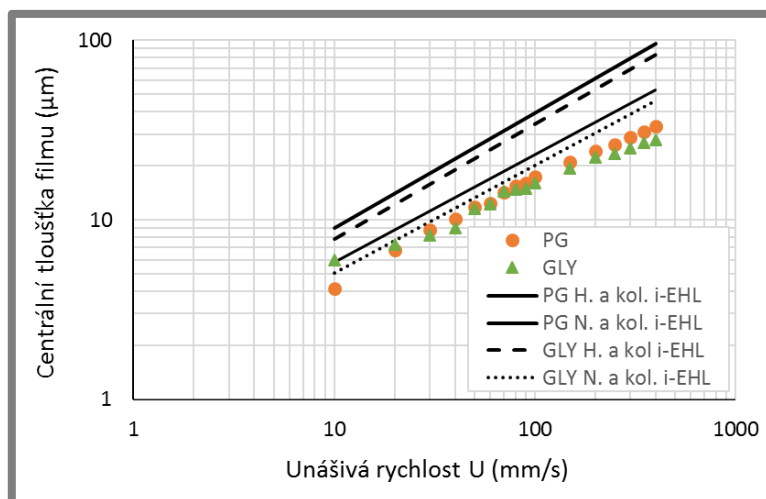
Obr. 5-15 Mapy tloušťky filmu v závislosti na unášivé rychlosti; $SRR = -1,2$; zatížení kontaktu činí $0,2\text{ N}$; použité mazivo je GLY; vstup do kontaktu je vždy vlevo; snímky jsou $3,8 \times 3,8\text{ mm}$ velké.

Vykreslené profily tloušťky filmu, z naměřených dat na Obr. 5-15, ve směru unášivé rychlosti jsou vykresleny na Obr. 5-16. Je patrné, že hydrodynamický klín ve zkoumaném intervalu rychlostí nedosahuje takové strmosti jako u předchozích experimentů, což ukazuje evidentní vliv negativního prokluzu na utváření mazacího filmu v poddajném kontaktu.



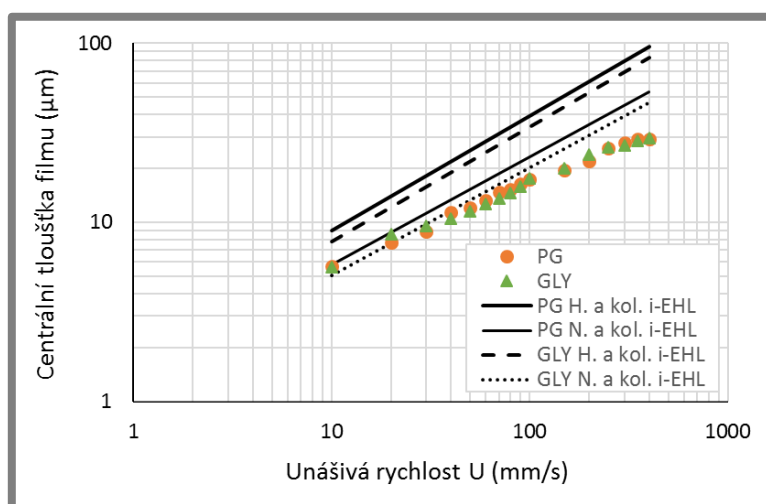
Obr. 5-16 Vykreslené profily tloušťky filmu v závislosti na vzdálenosti od středu kontaktu z naměřených dat na Obr. 5-15; vstup do kontaktu je vlevo.

Při dalším zvyšování negativního stupně prokluzu na hodnotu $-1,6$ došlo ke snížení centrálních tlouštěk filmu u obou maziv (Obr. 5-17). Při nižších rychlostech byla pro oba oleje naměřená téměř stejná tloušťka filmu, kde od rychlosti 100 mm/s byly zaznamenávány vyšší hodnoty pro PG. Při stejné rychlosti taktéž došlo ke změně sklonu lineární křivky u GLY. Nejvyšší naměřená tloušťka při $SRR = -1,6$ byla $33,2\text{ }\mu\text{m}$ pro mazivo PG a $28\text{ }\mu\text{m}$ pro GLY.



Obr. 5-17 Hodnoty centrální tloušťky filmu pro NBR vzorek v závislosti na rychlosti při $\text{SRR} = -1,6$.

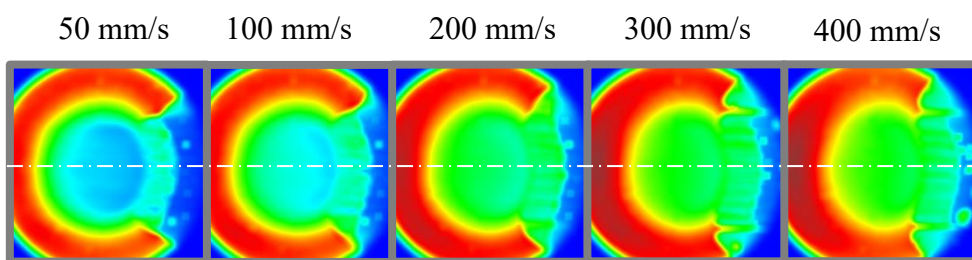
Další série experimentů byla provedena při čistém negativním prokluzu ($\text{SRR} = -2$), kdy kulička rotuje a disk je stacionární. Odečtená centrální tloušťka filmu srovnaná s teoretickou predikcí pro I-EHL dle [35] a [36] je vykreslena na Obr. 5-18. Naměřená data jsou pro obě maziva téměř shodná a vykazují lineární průběh, přičemž jsou výrazně nižší než teoretický předpoklad dle [35]. Při nižších rychlostech byla dobrá shoda zjištěných tlouštěk s teorií [36] pro GLY, ale při 150 mm/s došlo ke snížení sklonu lineárního nárůstu. Maximální naměřená centrální tloušťka se u obou olejů pohybovala pod hranicí 30 μm . Jelikož se centrální tloušťka pro čisté valení nacházela mezi teoretickými predikcemi dle Hamrocka a kol. [35] a Nijenhanna a kol. [36], tak výrazně nižší hodnoty u negativního prokluzu prokazují jednoznačný vliv SRR na tloušťku filmu.



Obr. 5-18 Hodnoty centrální tloušťky filmu pro NBR vzorek v závislosti na rychlosti při $\text{SRR} = -2$.

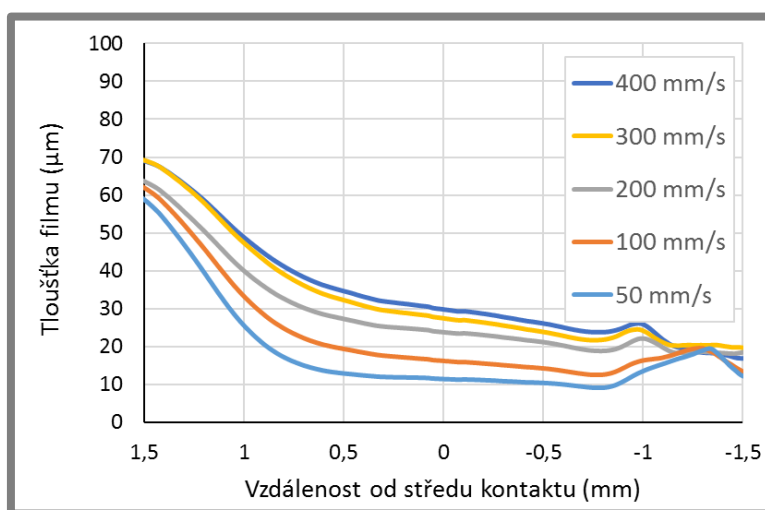
Na Obr. 5-19 jsou znázorněny intenzitní mapy tloušťky filmu kontaktu při různých unášivých rychlostech. Při zvyšujícím se negativním prokluzu je patrná

změna chování maziva na výstupu z kontaktu. Dochází zde k postupnému úbytku oleje, kde, v případě vyšších rychlostí, může docházet k hladovění kontaktu.



Obr. 5-19 Mapy tloušťky filmu v závislosti na unášivé rychlosti; SRR = -2; zatížení kontaktu činí 0,2 N; použité mazivo je GLY; vstup do kontaktu je vždy vlevo; snímky jsou 3,8 x 3,8 mm velké.

Na Obr. 5-20 jsou vykresleny profily tloušťky mazacího filmu v závislosti na vzdálenosti od středu kontaktu pro různé unášivé rychlosti. Tyto profily odpovídají ose vyznačené na Obr. 5-19. Stejně jako u předešlých experimentů lze pozorovat další snížení sklonu hydrodynamického klínu v porovnání s čistým valením. Při nižších rychlostech byl průběh profilu téměř lineární. Při zvyšování střední rychlosti je viditelný postupný nárůst tloušťky filmu, který však není rovnoměrný. Spíše dochází k postupnému přibližování profilů. To může být způsobeno změnou viskozity spojenou s výrazným nárůstem teploty maziva v kontaktu v důsledku vysokého prokluzu.



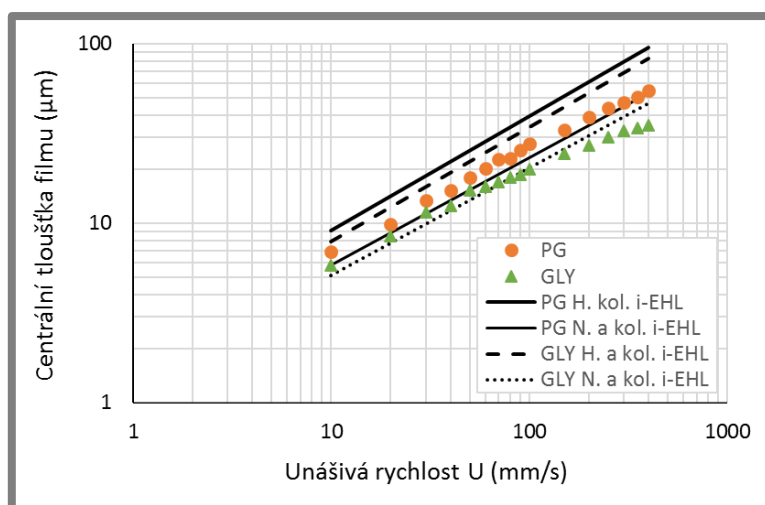
Obr. 5-20 Vykreslené profily tloušťky filmu v závislosti na vzdálenosti od středu kontaktu z naměřených dat na Obr. 5-19; vstup do kontaktu je vlevo.

5.3.3 Pozitivní prokluz

Opačným případem pro předchozí experimenty je pozitivní prokluz. Měření spočívá v postupném navyšování otáček disku při současném snižování rychlosti kuličky, kdy krajním případem je čistý pozitivní prokluz (SRR = 2), který probíhá za rotujícího disku a stacionární kuličky. Stejně jako u předchozích experimentů, je měření za částečného pozitivního prokluzu realizováno v postupných krocích míry prokluzu SRR = 0,4, 0,8, 1,2 a 1,6.

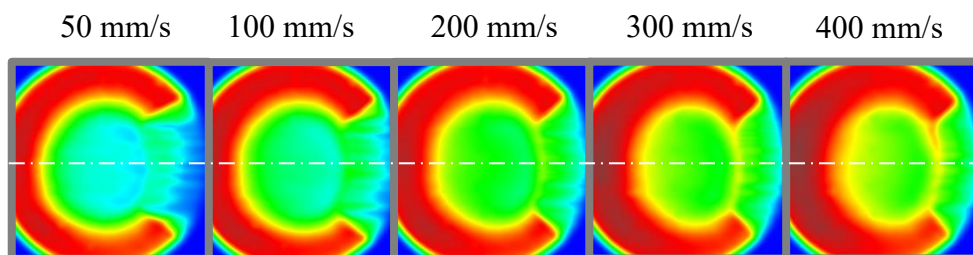
5.3.3

Naměřená centrální tloušťka filmu pro 40% prokluz je zaznamenána na Obr. 5-21. Zjištěné hodnoty vykazují téměř shodný průběh jako v experimentu pro čisté valení, kde byly naměřené tloušťky pro částečný pozitivní prokluz přibližně o 2 až 3 μm větší. U maziva GLY odpovídají vyhodnocené centrální tloušťky teoretické predikci dle Nijenbanninga a kol. [36] do rychlosti 100 mm/s, ale poté došlo k jejich postupnému snižování. U Polyglycolu se naměřené hodnoty pohybovaly mezi oběma teoriemi do rychlosti asi 200 mm/s. Následně však došlo k jejich ustálení na křivce dle Nijenbanninga a kol. [36]. Snižování tlouštěk filmu s vyšší unášivou rychlostí a zvyšujícím se stupněm prokluzu pro GLY může být způsobeno termálními efekty při průchodu maziva kontaktem. Rozsah experimentálně zjištěných hodnot se pohyboval v rozmezí od 6,9 do 55 μm u PG a od 5,8 do 35 μm pro GLY.

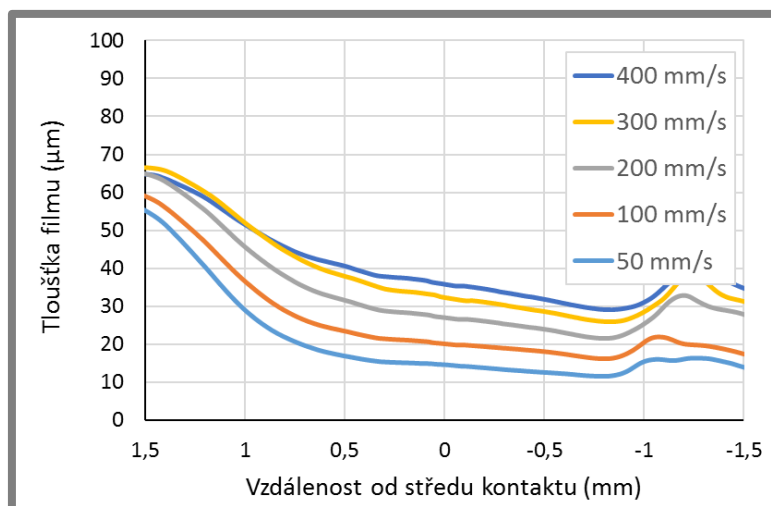


Obr. 5-21 Hodnoty centrální tloušťky filmu pro NBR vzorek v závislosti na rychlosti při $\text{SRR} = 0,4$.

Utváření mazacího filmu v kontaktu je vidět na Obr. 5-22. V rozsahu rychlostí od 40 do 100 mm/s bylo patrné utváření podkovy na výstupu z kontaktu. Vykreslené profily tloušťky filmu v závislosti na vzdálenosti od středu kontaktu jsou na Obr. 5-23. Oproti čistému valení došlo i u pozitivního prokluzu ke zmenšení sklonu klínové mezery oddělující kontaktní povrchy. Od rychlosti 200 mm/s docházelo ke snižování nárůstu tloušťky filmu.

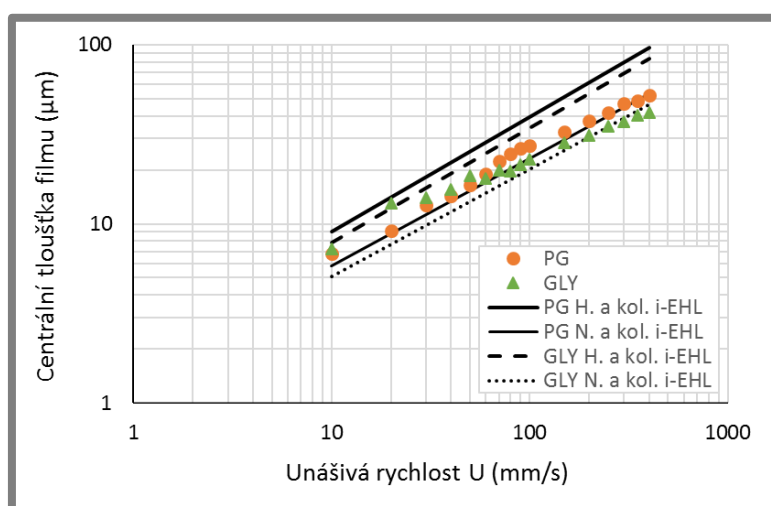


Obr. 5-22 Mapy tloušťky filmu v závislosti na unášivé rychlosti; $\text{SRR} = 0,4$; zatížení kontaktu činí 0,2 N; použité mazivo je GLY; vstup do kontaktu je vždy vlevo; snímky jsou 3,8 x 3,8 mm velké.



Obr. 5-23 Vykreslené profily tloušťky filmu v závislosti na vzdálenosti od středu kontaktu z naměřených dat na Obr. 5-22; vstup do kontaktu je vlevo.

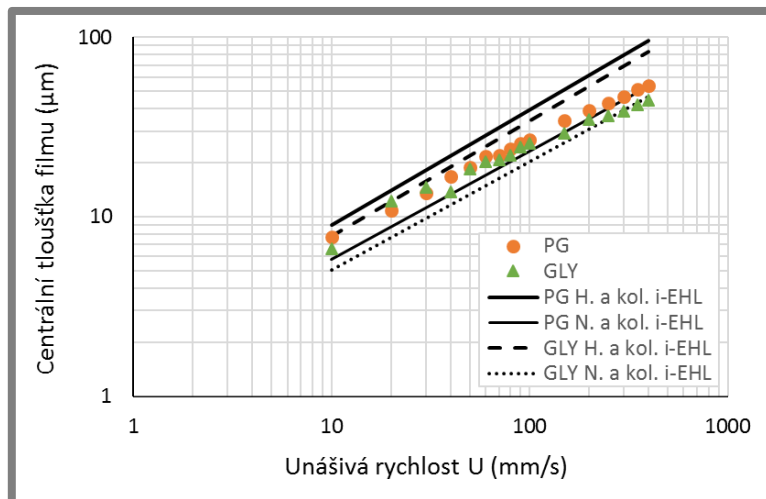
Dalším zvýšením pozitivního prokluzu na hodnotu 0,8 došlo k mírnému nárůstu tloušťky filmu pro mazivo GLY v rámci jednotek mikrometrů (Obr. 5-24). Hodnoty pro PG zůstaly téměř stejné jako v předešlém experimentu. Do střední rychlosti 40 mm/s naměřené tloušťky vykazovaly rozptýl. U PG byl patrný pravidelný lineární nárůst centrální tloušťky filmu, kdy v celém rozsahu zkoumaných středních rychlostí vykazoval velmi dobrou shodu s teoretickou predikcí podle Nijenbanninga a kol. [36]. Nejvyšší naměřená tloušťka činila 52,2 μm . U maziva GLY se zjištěné hodnoty pohybovaly nejprve mezi predikcemi [35] a [36], avšak při 60 mm/s došlo k jejich propadu na teoretickou křivku [36]. Centrální tloušťky filmu dosahovaly maximální hodnoty přibližně 42 μm .



Obr. 5-24 Hodnoty centrální tloušťky filmu pro NBR vzorek v závislosti na rychlosti při $\text{SRR} = 0,8$.

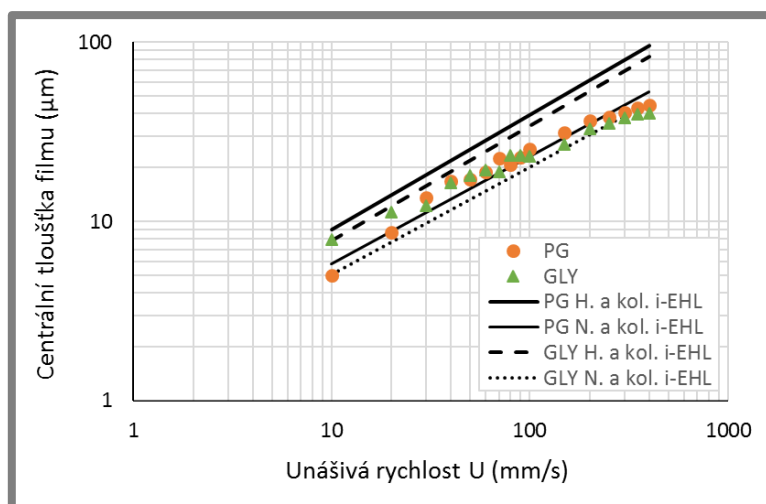
V následující sadě měření došlo k přiblížení naměřených hodnot použitých maziv (Obr. 5-25). K tomuto přiblížení došlo na základě mírného nárůstu tlouštěk pro GLY. U obou maziv byl zřejmý lineární nárůst centrálních tlouštěk v závislosti na unášivé

rychlosti. Do střední rychlosti 100 mm/s byly zjištěné tloušťky filmu pro PG i GLY téměř totožné a od 150 mm/s se experimentální tloušťky filmu velmi dobře shodují s předpokládanými hodnotami dle Nijenbanninga a kol. [36]. Nejvyšší naměřená tloušťka filmu dosahovala 53,7 μm u PG a 44,4 μm u GLY.



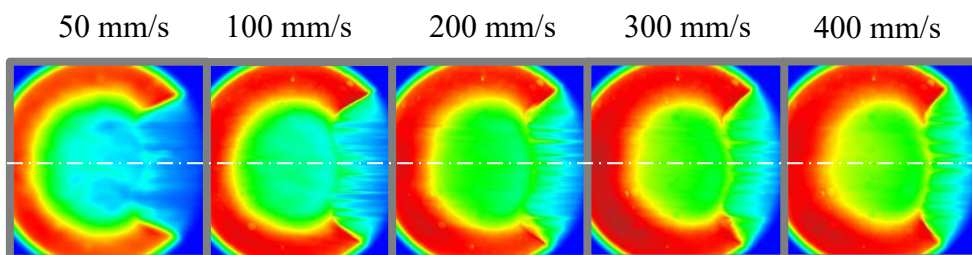
Obr. 5-25 Hodnoty centrální tloušťky filmu pro NBR vzorek v závislosti na rychlosti při $\text{SRR} = 1,2$.

Se zvýšením stupně pozitivního prokluzu na 160 % vykazovaly naměřené tloušťky maziva větší rozptyl než v předchozích experimentech. Při nižších rychlostech se zjištěné hodnoty pohybovaly mezi predikcemi [35] a [36] pro obě maziva. Se zvýšením střední rychlosti došlo k postupnému snížení centrálních tlouštěk, kde se od 250 do 400 mm/s pohybovaly mírně pod teorií dle Nijenbanninga a kol. [36], viz Obr. 5-26. Nejvyšší naměřené hodnoty pro mazivo PG a GLY byly 44,6 μm a 40 μm .

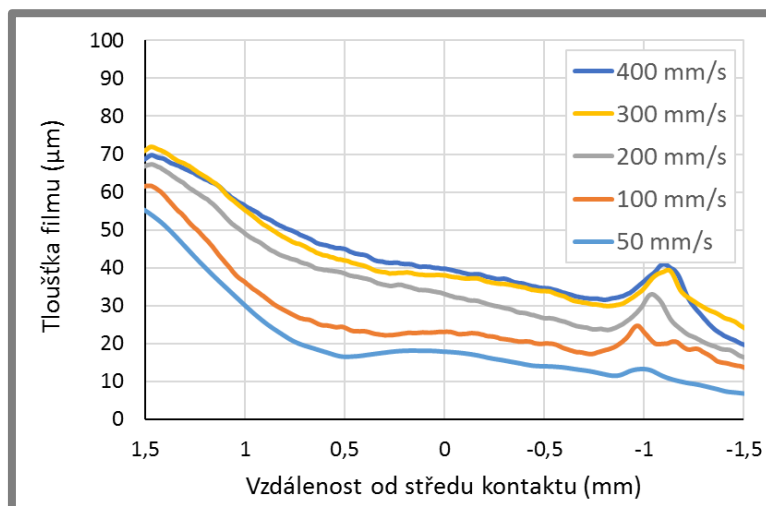


Obr. 5-26 Hodnoty centrální tloušťky filmu pro NBR vzorek v závislosti na rychlosti při $\text{SRR} = 1,6$.

Při pozitivním prokluzu $SRR = 1,6$ bylo na snímcích kontaktu zřetelné ovlivnění tloušťky filmu vlivem vysoké drsnosti povrchu kuličky (Obr. 5-27), které však s narůstající střední rychlostí zanikalo. Profily tloušťky filmu v závislosti na vzdálenosti od středu kontaktu podél vyznačené osy jsou vykresleny na Obr. 5-28. U rychlostí 50 a 100 mm/s docházelo k lokálnímu nárůstu zjištěných hodnot tloušťky filmu v centrální oblasti kontaktu.



Obr. 5-27 Mapy tloušťky filmu v závislosti na unášivé rychlosti; $SRR = 1,6$; zatížení kontaktu činí 0,2 N; použité mazivo je GLY; vstup do kontaktu je vždy vlevo; snímky jsou 3,8 x 3,8 mm velké.

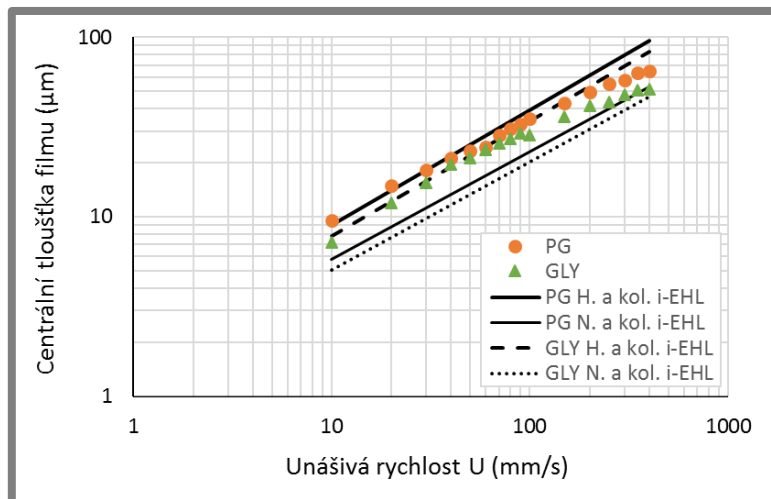


Obr. 5-28 Vykreslené profily tloušťky filmu v závislosti na vzdálenosti od středu kontaktu z naměřených dat na Obr. 5-27; vstup do kontaktu je vlevo.

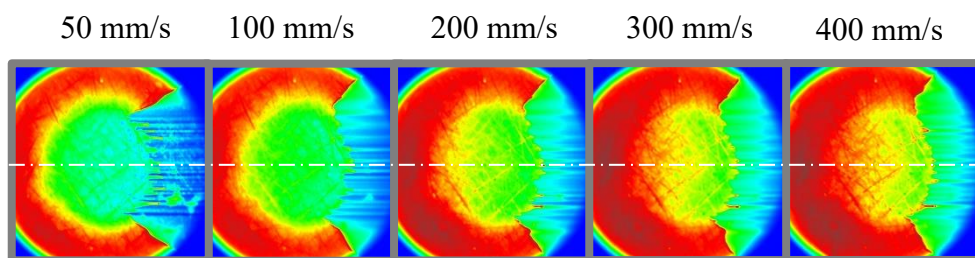
Výsledky posledního experimentálního měření za rotujícího disku a stacionární kuličky jsou na Obr. 5-29. Oproti předchozím měřením došlo k výraznému nárůstu centrální tloušťky filmu, kde byla při nižších rychlostech patrná velmi dobrá shoda s teoretickou predikcí dle Hamrocka a kol. [35]. Od rychlosti přibližně 150 mm/s došlo k jejich mírnému odklonění, ale i přesto se zjištěné hodnoty pohybovaly nad predikcí podle Nijenbanninga a kol. [36]. Rozsah naměřených tlouštěk filmu se pohyboval v rozmezí od 9,5 do 64,8 μm pro PG a od 7,2 do 51,5 μm pro GLY.

Na Obr. 5-30 jsou znázorněny snímky kontaktu pro různé unášivé rychlosti. Na rozdíl od předchozích měření bylo pozorováno utváření podkovy i při vyšších unášivých rychlostech. Z důvodu stacionární kuličky je výrazně patrná vysoká drsnost povrchu vzorku. V jednotlivých rýhách ulpívá mazivo a tím dochází k lokálním nárůstům tloušťky filmu. Ovlivnění tloušťky je zřetelně pozorovatelné na Obr. 5-31. Vstup do kontaktu je vždy vlevo. Z těchto dat je zřejmé, že na odečítání tloušťky filmu

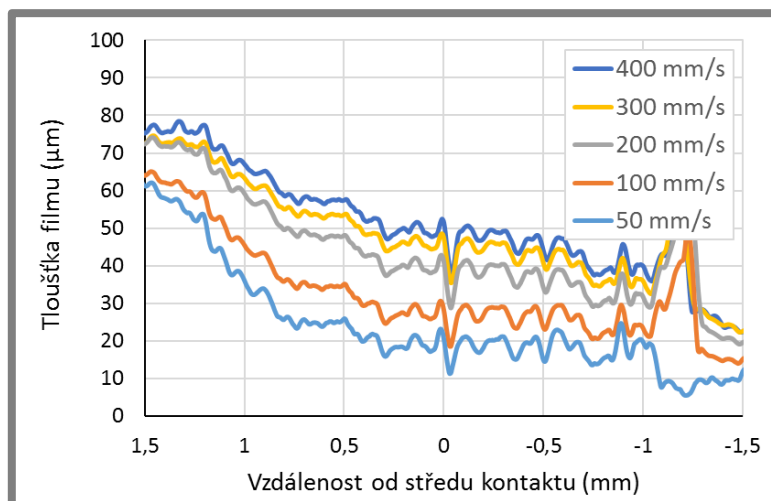
má významný vliv drsnost povrchu. S posunem osového kříže ve vyhodnocovacím softwaru docházelo ke změnám v profilech tloušťky filmu právě v závislosti na rozložení rýh po povrchu vzorku. I přes toto ovlivnění je však patrné utváření klínové mezery mezi kontaktními tělesy.



Obr. 5-29 Hodnoty centrální tloušťky filmu pro NBR vzorek v závislosti na rychlosti při $\text{SRR} = 2$.



Obr. 5-30 Mapy tloušťky filmu v závislosti na unášivé rychlosti; $\text{SRR} = 2$; zatížení kontaktu činí $0,2 \text{ N}$; použité mazivo je GLY; vstup do kontaktu je vždy vlevo; snímky jsou $3,8 \times 3,8 \text{ mm}$ velké.



Obr. 5-31 Vykreslené profily tloušťky filmu v závislosti na vzdálenosti od středu kontaktu z naměřených dat na Obr. 5-32; vstup do kontaktu je vlevo.

5.4 Vliv stupně prokluzu na centrální tloušťku filmu

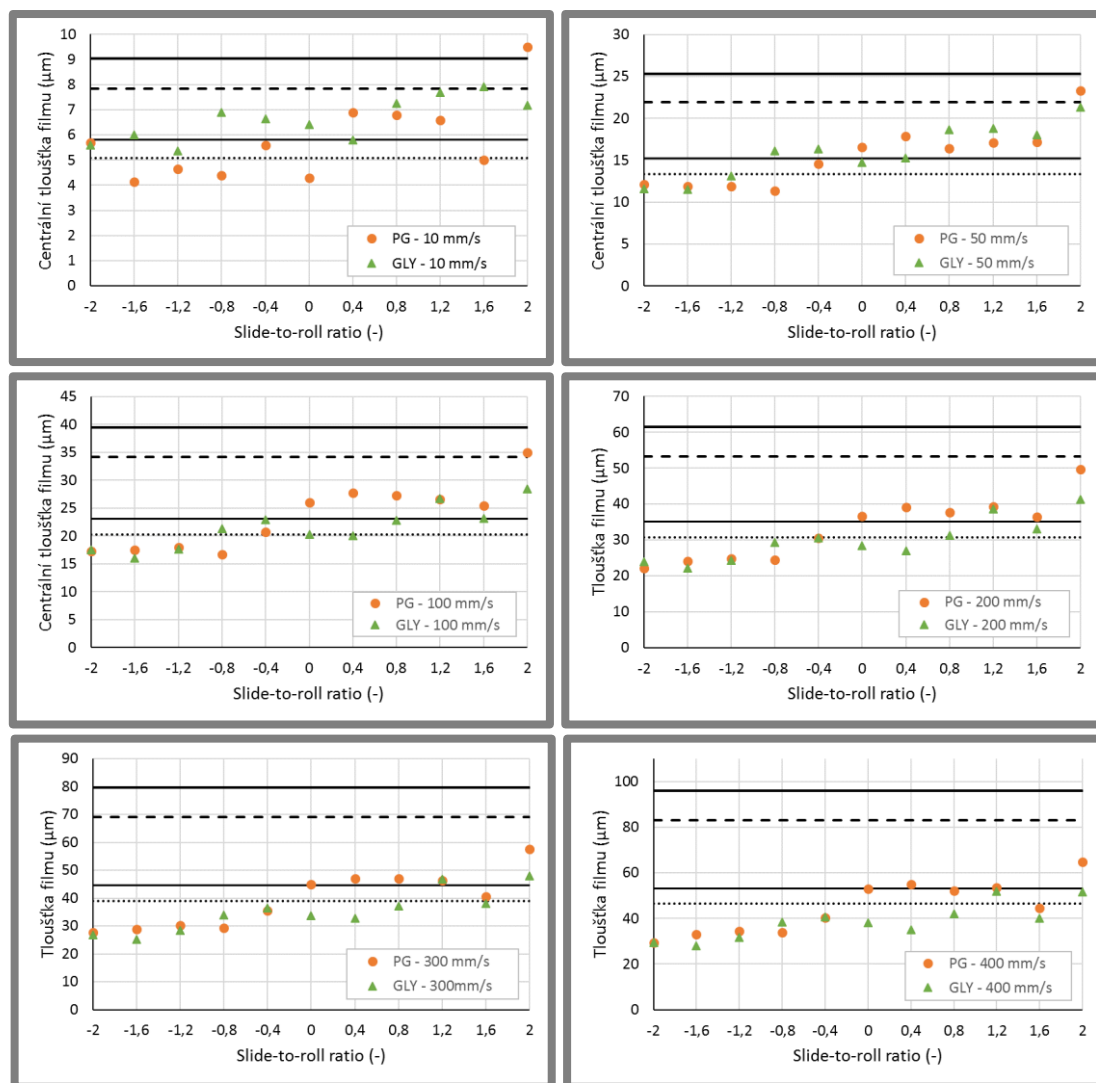
V následující kapitole jsou výše provedené experimenty sumarizovány a jsou vykresleny závislosti centrální tloušťky filmu na stupni prokluzu. Výsledky tak jasně popisují vliv kinematických podmínek na utváření mazacího filmu v centrální části kontaktu.

Na Obr. 5-32 jsou vykresleny centrální tloušťky filmu v závislosti na stupni prokluzu pro různé unášivé rychlosti. Uprostřed každého z grafů jsou vyznačeny naměřené hodnoty pro čisté valení, kde se tloušťky pro PG se zvyšující se rychlostí přibližují teoretické predikci dle Nijenbanninga a kol. [36]. Pro všechna experimentální měření obecně platilo, že naměřené hodnoty při nižších rychlostech vykazovaly značný rozptyl. Toto chování je dobře patrné na grafu pro střední rychlost 10 mm/s, kde nebylo možné jednoznačně prokázat trend utváření mazacího filmu v závislosti na prokluzu. Zároveň pro mazivo GLY byla naměřená tloušťka filmu téměř pro všechny SRR vyšší než pro PG, přesto, že by to dle teoretické predikce mělo být naopak. Při zvýšení unášivé rychlosti na 50 mm/s došlo k určitému stabilizování, takže další průběh naměřených hodnot pro všechny rychlosti zůstal téměř totožný.

Při negativním prokluzu byla zjištěná tloušťka filmu převážně nižší oproti čistému valení. U maziva PG došlo k téměř okamžitému poklesu a od stupně prokluzu -0,8 do -2 k ustálení hodnot. Pro GLY došlo k tomuto snížení u hodnoty $SRR = -0,8$ a poté znovu došlo k ustálení. Zároveň se naměřené hodnoty obou maziv přibližovaly a v některých případech došlo dokonce k jejich překrytí. Z toho vyplývá, že rozdílné viskozity použitých maziv při vyšších negativních stupních prokluzu neměly na měření zásadní vliv.

Naopak se zvyšujícím se pozitivním prokluzem docházelo spíše k nárůstu naměřených tlouštěk. To bylo pozorováno především u maziva PG, kde s hodnotou pozitivního prokluzu $SRR = 0,4$ došlo k okamžitému nárůstu tloušťky, která následně zůstávala přibližně stejná do prokluzu 1,2. Při $SRR = 1,6$ došlo k mírnému snížení naměřených hodnot, při vyšších rychlostech hodnoty klesly dokonce pod tloušťky filmu zjištěné při čistém valení. Posledním zkoumaným pozitivním prokluzem byl $SRR = 2$. V této sadě došlo k výraznému zvýšení tloušťky filmu, a tím ke zřetelnému přiblížení k teoretické predikci dle Hamrocka a kol. [35]. U maziva GLY se naměřená centrální tloušťka pro pozitivní prokluz pohybovala přibližně na úrovni výsledků při $SRR = 0$ a pouze při prokluzu 1,2 a 2 došlo k jejímu výraznějšímu nárůstu.

Co se týče celkového pohledu na rozložení naměřených hodnot pro analyzovaná maziva, lze konstatovat, že obě kapaliny vykazují odlišné chování. Mazivo PG vykazoval tvar písmene „S“ napříč celým intervalem měřených prokluzů, kde při pozitivním prokluzu se naměřené tloušťky pohybovaly pod úrovní hodnot pro čisté valení a při pozitivním prokluzu došlo k nárůstu centrální tloušťky vůči $SRR = 0$. Jediná odchylka byla zaznamenána při $SRR = 1,6$. Pro mazivo GLY u negativních hodnot nedošlo k tak výraznému poklesu jako u PG a na pozitivní straně vyznačené osy zpočátku nedocházelo k téměř žádnému nárůstu. Se zvyšující se mírou prokluzu bylo možné pozorovat značně nestabilní chování, které se projevovalo jak nárůsty, tak poklesy tloušťky filmu bez jasného trendu.



Obr. 5-32 Centrální tloušťka v závislosti na stupni prokluzu pro různé střední rychlosti – 10 mm/s, 50 mm/s, 100 mm/s, 200 mm/s, 300 mm/s a 400 mm/s.

— PG Hamrock a kol. i-EHL
 — PG Nijenhuis a kol. i-EHL
 - - GLY Hamrock a kol. i-EHL
 GLY Nijenhuis a kol. i-EHL

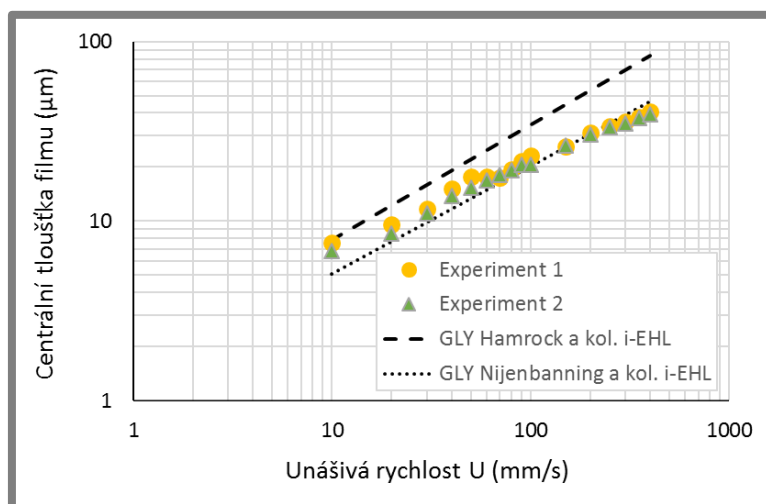
6 DISKUSE

6

6.1 Ověřovací experimenty

6.1

Z důvodu verifikace a validity naměřených dat bylo každé experimentální měření jedenkrát zopakováno za stejných kinematických podmínek v časovém odstupu přibližně jeden týden. Příklad ověřovacího experimentu v podobě centrálních tlouštěk filmu pro mazivo GLY při čistém valení je na Obr. 6-1. Při nižších rychlostech naměřená data vykazovala rozptýl, kdy s nárůstem unášivé rychlosti došlo k ustálení a hodnoty centrální tloušťky filmu se lišily pouze v rámci jednotek mikrometrů. Obecně bylo možné pozorovat ustálení hodnot a tedy shodu výsledků jednotlivých experimentů s teoretickou predikcí přibližně od rychlosti 100 mm/s. Odchyłky při nižších rychlostech lze připsat celkové nestabilitě systému, mírnému kolísání zatížení, apod. Dalším faktorem, který ovlivňuje tloušťku filmu při nižších unášivých rychlostech, může být vysoká drsnost povrchu pryžové kuličky.



Obr. 6-1 Ověřovací experiment naměřených centrálních tlouštěk pro mazivo GLY při čistém valení.

6.2 Vliv materiálu

6.2

Na naměřené hodnoty tloušťky filmu má výrazný vliv materiál použité kuličky (Youngův modul pružnosti, Poissonův poměr). Roli hraje rovněž drsnost povrchu. Pro odladění měřicí metody a prokázání validity vyhodnocení byla nejprve analyzována tloušťka filmu v tuhém kontaktu. Byl použit keramický vzorek, kdy zjištěné hodnoty vykazovaly velmi dobrou shodu s teoretickou predikcí [37] (Obr. 5-3, str. 38). Následně byly provedeny experimenty pro kuličku z fenolové pryskyřice, jejíž modul pružnosti je v porovnání s keramikou výrazně nižší, stále však dosahuje řádu GPa. Naměřené hodnoty byly o něco vyšší než teoretická predikce dle Hamrocka a Dowsona [37] pro EHL. Tuto skutečnost lze přisoudit tomu, že se jedná o vzorek, který představuje určitý přechod mezi tuhými a poddajnými kontakty.

Pro další měření a splnění hlavního cíle práce byl použit poddajný materiál s označením NBR. Oproti předchozím materiálům měl výrazně nižší modul pružnosti, což vedlo k podstatnému nárůstu tlouštěk filmu až na několik desítek mikrometrů. Zároveň docházelo ke zřetelnému formování hydrodynamického klínu

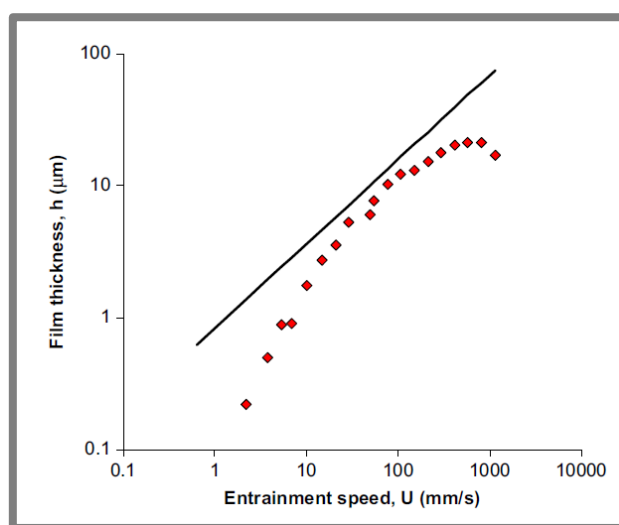
(Obr. 5-9, str. 42), kdy se zvyšující se unášivou rychlostí jeho sklon postupně narůstal. Tento trend pozoroval také Fowell a kol. [11], viz Obr. 2-18 vlevo (str. 27).

6.3 Vliv maziva

Pro objasnění utváření mazacího filmu v poddajném kontaktu byla použita dvě maziva o různé dynamické viskozitě. Jednalo se o Polyglycol ($1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) a Glycerol ($0,8 \text{ Pa}\cdot\text{s}$). Výsledky při čistém valení (Obr. 5-7, str. 41) prokazují lineární nárůst centrální tloušťky filmu pro obě maziva. Naměřené hodnoty se v tomto experimentu velmi dobře shodovaly s teoretickými hodnotami podle Nijenbanninga a kol [36]. Pro viskóznější mazivo PG dosahovaly zjištěné hodnoty vyšších hodnot než u GLY. Rozdíl naměřených tloušťek při nižších rychlostech odpovídal rozdílu teoretických predikcí. Od rychlosti přibližně 150 mm/s došlo k jejich mírnému odklonění, které bylo způsobeno mazivem GLY. Toto může být zapříčiněno větší citlivostí viskozity Glycerolu na změnu teploty, která mohla při průchodu kontaktem ve vyšších rychlostech narůstat. Dalším ovlivňujícím faktorem v případě použití tohoto maziva mohly být jeho hygroskopické vlastnosti, tedy schopnost maziva pohlcovat vzdušnou vlhkost.

6.4 Vliv střední rychlosti

Pro porovnání vlivu unášivé rychlosti s již publikovanými studiemi od Myanta a kol. [10] a Fowella a kol. [11], kde autoři měřili centrální tloušťky filmu za čistého pozitivního prokluzu, lze uvést data, které jsou vyobrazeny na Obr. 5-29 (str. 52). Naměřené výsledky se při nižších rychlostech pohybovaly na teoretické predikci dle Hamrocka a kol. [35]. Při vyšších rychlostech docházelo u obou maziv ke snížení sklonu lineárního nárůstu a tím k přiblížení k teoretické predikci dle Nijenbanninga a kol. [36], což mohlo být částečně způsobeno vlivem maziva, který byl popsán v kapitole 6.3. Jako další příčinu tohoto chování autoři v publikaci [10] uváděli možnost omezené dodávky maziva do kontaktu a tím pravděpodobnost jeho hladovění při vyšších rychlostech (Obr. 6-2). Jelikož v této diplomové práci nebyl kontakt plně zaplavený, ale dávkování probíhalo přes rotující kuličku u negativních prokluzů nebo



Obr. 6-2 Centrální tloušťka filmu v závislosti na unášivé rychlosti při zatížení 25 mN pro mazivo GLY a $\text{SRR} = 2$. Plná čára představuje teoretickou predikci dle Hamrocka a kol. pro viskozitu $\eta = 0,15 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ [10].

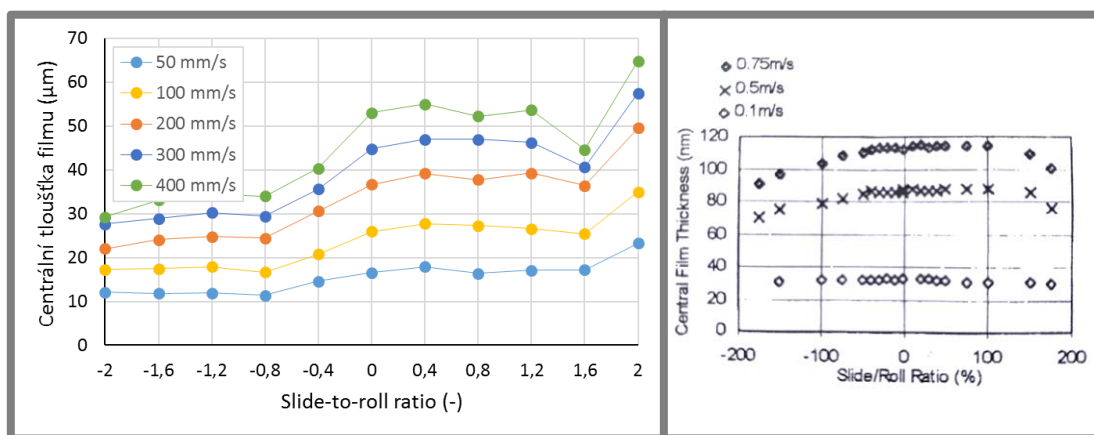
externím systémem při čistém pozitivním prokluzu, dá se předpokládat, že i zde docházelo k hladovění kontaktu. Tuto skutečnost potvrzují mapy tloušťky filmu na Obr. 5-30 (str. 52), kde jsou patrná přerušení mazacího filmu na výstupu z kontaktu.

Již v kapitole 6.1 bylo zmíněno možné ovlivnění měření způsobené drsností povrchu použitého vzorku. Ta byla analyzována s využitím optického profilometru (BRUKER CONTOUR GT-X) pracujícího na principu interferometrie s řízenou změnou fáze, kde změřená nejvyšší výška profilu (R_z) v některých místech na povrchu dosahovala více než 10 μm . Toto ovlivnění tloušťky filmu je zřetelné především na měření se stupněm prokluzu 2 na Obr. 5-31 (str. 52), kde je jasně patrná struktura povrchu kuličky pro celý rozsah analyzovaných středních rychlostí. U ostatních experimentálních měření, která probíhala za rotace kuličky, se ovlivnění tloušťky filmu projevilo zejména při nižších unášivých rychlostech. U vyšších rychlostí se tento vliv postupně vytrácel v důsledku elastických deformací povrchu.

Na základě pozorování lokálních nárůstů tloušťky filmu způsobených strukturou povrchu vzorku lze konstatovat, že pomocí fluorescenční mikroskopie je možné analyzovat i topografii povrchu, což demonstrovali autoři Hidrovo a Hart v práci [30].

6.5 Vliv stupně prokluzu

Podle teoretických předpokladů [34, 35] by stupeň prokluzu neměl mít žádný vliv na utváření mazacího filmu v centrální oblasti kontaktu, avšak z výsledků uvedených na Obr. 6-3 vyplývá evidentní vliv SRR na tloušťku maziva. Vliv stupně prokluzu se v případě dvou použitých maziv lišil, kde u PG bylo možné pozorovat ustálení hodnot ve tvaru písmene "S". Při záporném prokluzu obecně docházelo k naměření nižších tlouštěk filmu oproti čistému valení, kde v práci [19] autoři Myant a kol. pozorovali při $\text{SRR} = -2$ rovněž výrazně nižší naměřené hodnoty centrálních tlouštěk filmu v porovnání s teoretickými hodnotami. Pozitivní prokluz vedl naopak k formování vyšších tlouštěk maziva. Toto chování mohlo být způsobeno odlišným dávkováním maziva do kontaktu u pozitivních, resp. u negativních prokluzů. Dalším důvodem nesymetrického průběhu naměřených hodnot v intervalu zkoumaných prokluzů mohly být termální jevy, které v práci diskutovali autoři Smeeth a Spikes [38]. V této studii hodnoty centrální tloušťky v závislosti na stupni prokluzu v kontaktu ocelové kuličky a skleněného disku při různých unášivých rychlostech vykazovaly rovněž nesymetrický průběh (Obr. 6-3 vpravo). Avšak při vyšších hodnotách prokluzů zaznamenaly vždy nižší hodnoty oproti čistému valení.



Obr. 6-3 Centrální tloušťka filmu v závislosti na SRR pro vybrané střední rychlosti v poddajném kontaktu pro mazivo PG vlevo; závislost SRR na centrální tloušťce filmu v tuhém kontaktu vpravo[38].

Z naměřených dat na Obr. 6-3 vlevo je zejména v případě vyšších rychlostí patrný propad hodnot při stupni prokluzu $SRR = 1,6$ a naopak značný nárůst při $SRR = 2$. Náhlý pokles hodnot může být způsobený nedostatečnou dodávkou maziva do kontaktu, kterou zajišťovala primárně kulička, po níž mohlo v průběhu experimentu docházet ke stékání použitého maziva. V případě čistého pozitivního prokluzu docházelo k ovlivnění odečtu centrální tloušťky filmu vlivem vysoké drsnosti povrchu vzorku. Tomuto vlivu bylo částečně zamezeno výpočtem průměrné hodnoty centrální tloušťky z oblasti o poloměru 5 pixelů.

6.6 Limitace použité metody

Vzhledem k použité metodě a materiálům je vhodné uvést určité limitace, které mohly v průběhu měření ovlivňovat naměřené hodnoty. Jedním z hlavních ovlivnění mohla být teplota maziva, která byla diskutována také ve studiích pro poddajné [10, 11] i tuhé [38] kontakty. V této diplomové práci byla teplota měřena v průběhu každého experimentu v místě před vstupem do kontaktu. Maximální rozdíl před a po měření byl přibližně jeden stupeň Celsia, při vstupu do kontaktu však mohlo docházet k jejímu výraznějšímu zvýšení, a tím k určitému poklesu viskozity maziva a zároveň snížení tloušťky filmu. Toto ovlivnění se dá předpokládat především při vyšších rychlostech a vyšších stupních prokluzu. Tomuto mohlo být částečně zamezeno v případě čistého pozitivního prokluzu, kde bylo do kontaktu přiváděno pouze čerstvé mazivo z dávkovacího zařízení.

Z důvodu použití experimentální aparatury, která je určena primárně pro studium tuhých kontaktů a kde zatěžování probíhá přes pákový mechanismus, mohlo také docházet k mírnému ovlivnění naměřených dat způsobenému fluktuacemi zatížení kontaktu. Z tohoto důvodu byl pákový systém zafixován v jedné poloze, kde se poté mohlo projevit pouze mírné kolísání zatížení způsobené nepřesnou geometrií kuličky.

Ze snímků kontaktů pro jednotlivá experimentální měření bylo vypořádáno rozdílné rozložení intenzity osvětlení, které bylo způsobeno rozdílným nasměrováním světelného paprsku rtuťové lampy pro jednotlivá měření. Zároveň mohlo docházet k určitému kolísání osvětlení v průběhu experimentů. Toto ovlivnění by mohlo být primárně eliminováno tzv. normalizací, která spočívá v podílu intenzity jednotlivých pixelů snímku kontaktu k intenzitě pixelů normalizačního snímku (snímku pozadí) na stejných pozicích. Tento přístup eliminace vlivu nehomogenního osvětlení a vlivu pozadí byl použit také v pracích [10, 11].

Určení velikosti zatížení kontaktu bylo provedeno odečtem velikosti kontaktní oblasti ze statického snímku a přes Hertzovu teorii bylo následně vypočítáno kontaktní zatížení. Odečtem poloměru kontaktní oblasti mohlo dojít k vnesení chyby vinou uživatele a tím k určitému ovlivnění naměřených dat.

7 ZÁVĚR

V této diplomové práci byla odladěna metoda fluorescenční mikroskopie pro studium utváření mazacího filmu v poddajných kontaktech. Byla provedena série experimentálních měření s primárním cílem popsat vliv stupně prokluzu na utváření mazacího filmu v centrální oblasti kontaktu. Podle teoretických predikcí [34, 35] by stupeň prokluzu neměl mít vliv na centrální tloušťku filmu, avšak z dřívějších studií pro tuhé kontakty [38] vyplývá, že je tomu naopak. Na základě provedených experimentů byly také diskutovány další vlivy jako je viskozita maziva, materiál kontaktních těles, či vliv střední rychlosti na vývoj centrální tloušťky filmu.

Pro vytvoření a ověření validity vyhodnocovacího modulu v rámci softwaru AChILES byl použit klasický EHD kontakt tvořený keramickou kuličkou (Si_3N_4) a skleněným diskem (BK7). Naměřené hodnoty vykazovaly velmi dobrou shodu s teoretickou predikcí podle Hamrocka a Dowsona [37], která je v oblasti tribologie dlouhodobě zavedena.

Následně byla provedena experimentální měření v poddajném kontaktu pryžové kuličky (NBR) a skleněného disku (BK7) pro maziva PG a GLY při různých stupních prokluzu. Z naměřených dat vyplynul evidentní vliv stupně prokluzu na centrální tloušťku filmu. Bylo zjištěno, že při negativních prokluzech se naměřená data pohybovala pod hodnotami čistého valení, a naopak při pozitivních SRR docházelo spíše k nárůstu tlouštěk filmu v porovnání s čistým valením. Na základě srovnání hodnot s již publikovanými studiemi [10, 11] pro poddajné kontakty vyplývá, že primární vliv na utváření mazacího filmu v kontaktu mohla mít teplota maziva a unášivá rychlost. Rozsah naměřených tlouštěk filmu se pohyboval v rozmezí přibližně od 5 do 52 μm . Poznatky z diplomové práce jsou shrnuty v následujících bodech:

- Odladěná měřicí metoda umožňuje měřit tloušťku filmu od jednotek do desítek mikrometrů.
- Byla nalezena shoda naměřených hodnot s teoretickou predikcí. Zjištěné hodnoty centrální tloušťky filmu vykazovaly se zvyšující se unášivou rychlostí lineární nárůst stejně jako teoretické hodnoty.
- Stupeň prokluzu má zřejmý dopad na tloušťku mazacího filmu.
- Negativní stupeň prokluzu vedly na nižší tloušťku filmu oproti čistému valení.
- Při pozitivních SRR se naměřené tloušťky filmu pohybovaly spíše nad hodnotami zjištěnými při čistém valení. Při $\text{SRR} = 2$ došlo k výraznému nárůstu naměřených tlouštěk, což však mohlo být z části zapříčiněno drsností povrchu kuličky, která je za daných kinematických podmínek stacionární.

Na základě experimentální studie lze potvrdit využitelnost fluorescenční mikroskopie z hlediska tribologických analýz v oblasti poddajných kontaktů. Pro zkvalitnění naměřených výsledků se nabízí zaimplementování procesu normalizace do vyhodnocovacího softwaru. Pro komplexnější studium poddajných kontaktů by bylo dobré navrhnout nový způsob zatěžování pro vyvození velmi malých zatížení v řádu setin až desetin Newtonů, a tím zároveň zamezit možnému kolísání zatížení v průběhu měření.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] LAKOWICZ, Joseph R. *Principles of Fluorescence Spectroscopy*. Third edition. Baltimore, Maryland, USA: Springer, 2006. ISBN 10: 0-387-31278-1.
- [2] FUJII, Yusaku. Method for measuring transient friction coefficients for rubber wiper blades on glass surface. *Tribology International*. 2008, 41(1), 17-23. DOI: 10.1016/j.triboint.2007.04.003. ISSN 0301679x. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X07000825>
- [3] PAN, X.-D. Significance of Tuning Bulk Viscoelasticity via Polymer Molecular Design on Wet Sliding Friction of Elastomer Compounds. *Tribology Letters*. 2005, 20(3-4), 209-219. DOI: 10.1007/s11249-005-8372-1. ISSN 1023-8883. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s11249-005-8372-1>
- [4] DE WIJK, René A. a Jon F. PRINZ. The role of friction in perceived oral texture. *Food Quality and Preference*. 2005, 16(2), 121-129. DOI: 10.1016/j.foodqual.2004.03.002. ISSN 09503293. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950329304000321>
- [5] JIN, Z M a D DOWSON. Elastohydrodynamic Lubrication in Biological Systems. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: *Journal of Engineering Tribology*. 2005-6-1, 219(5), 367-380. DOI: 10.1243/135065005X33982. ISSN 1350-6501. Dostupné také z: <http://sdj.sagepub.com/lookup/10.1243/135065005X33982>
- [6] BONGAERTS, J.H.H., K. FOURTOUNI a J.R. STOKES. Soft-tribology: Lubrication in a compliant PDMS–PDMS contact. *Tribology International*. 2007, vol. 40, 10-12, s. 1531-1542. ISSN 0301-679X. DOI: 10.1016/j.triboint.2007.01.007. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X07000126>
- [7] DE VICENTE, J, J R STOKES a H A SPIKES. Rolling and sliding friction in compliant, lubricated contact. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: *Journal of Engineering Tribology*. 2006-4-1, 220(2), 55-63. DOI: 10.1243/13506501JET90. ISSN 1350-6501. Dostupné také z: <http://sdj.sagepub.com/lookup/10.1243/13506501JET90>
- [8] MYANT, C., H. A. SPIKES a J.R. STOKES. Influence of load and elastic properties on the rolling and sliding friction of lubricated compliant contacts. *Tribology International*. 2010, 43(1-2), 55-63. DOI: 10.1016/j.triboint.2009.04.034. ISSN 0301679x. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X09000145>
- [9] ROBERTS, A. D. a D. TABOR. Fluid film lubrication of rubber-an interferometric study. *Wear*. 1968, vol. 11, is. 2, s. 163-166. ISSN 0043-1648. DOI:10.1016/0043-1648(68)90594-2. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0043164868905942>
- [10] MYANT, C., T. REDDYHOFF a H. A. SPIKES. Laser-induced fluorescence for film thickness mapping in pure sliding lubricated, compliant, contacts. *Tribology International*. 2010, vol. 43, issue 11, s. 1960-1969. DOI: 10.1016/j.triboint.2010.03.013.

- [11] FOWELL, M., T., C. MYANT, T., H. A. SPIKES, A. Karidic. A study of lubricant film thickness in compliant contacts of elastomeric seal materials using a laser induced fluorescence technique. *Tribology International*. 2014, vol. 80, s. 76-89.
- [12] SPIKES, H.A. Thin films in elastohydrodynamic lubrication: the contribution of experiment. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: *Journal of Engineering Tribology*, 1999, 213(5), 335-352.
- [13] ALBAHRANI, S., PHILIPPON, D.; VERGNE, P.; BLUET, J. A review of in situ methodologies for studying elastohydrodynamic lubrication. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: *Journal of Engineering Tribology*, 2015, 230(1), 86-110.
- [14] LANE, T. B. a J.R. HUGHES. A study of the oil-film formation in gears by electrical resistance measurements. *British Journal of Applied Physics*. 1952, 315-318.
- [15] WILSON A. R. The relative thickness of grease and oil films in rolling bearings. *Proc Instn Mech Engrs* 1979; 193: 185–192.
- [16] SMITH, S L, D DOWSON, A A J GOLDSMITH, R VALIZADEH a J S COLLIGON. Direct evidence of lubrication in ceramic-on-ceramic total hip replacements. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: *Journal of Mechanical Engineering Science*. 2001-1-1, 215(3), 265-268. DOI: 10.1243/0954406011520706. ISSN 0954-4062. Dostupné také z: <http://pic.sagepub.com/lookup/doi/10.1243/0954406011520706>
- [17] KIRK, M. T. Hydrodynamic Lubrication of 'Perspex'. *Nature*. 1962-6-9, 194(4832), 965-966. DOI: 10.1038/194965a0. ISSN 0028-0836. Dostupné také z: <http://www.nature.com/doi/10.1038/194965a0>
- [18] CAMERON, A. a R. GOHAR. Theoretical and Experimental Studies of the Oil Film in Lubricated Point Contact. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1966, 291(1427), 520-536. DOI: 10.1098/rspa.1966.0112. ISSN 1364-5021. Dostupné také z: <http://rspa.royalsocietypublishing.org/cgi/doi/10.1098/rspa.1966.0112>
- [19] MYANT, Connor, Mark FOWELL, Hugh A. SPIKES a Jason R. STOKES. An Investigation of Lubricant Film Thickness in Sliding Compliant Contacts. *Tribology Transactions*. 2010, 53(5), 684-694. DOI: 10.1080/10402001003693109. ISSN 1040-2004. Dostupné také z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10402001003693109>
- [20] SMART, A. E. a R. A. J. FORD. Measurement of thin liquid films by a fluorescence technique. *Wear*. 1974, vol. 29, issue 1, s. 41-47. DOI: 10.1016/0043-1648(74)90132-x.
- [21] GABELLI, A. a G. POLL. Formation of Lubricant Film in Rotary Sealing Contacts: Part I: Lubricant Film Modeling. *Journal of Tribology*. 1992, vol. 114, issue 2, s. 280-. DOI: 10.1115/1.2920885
- [22] POLL, G. a A. GABELLI. Formation of Lubricant Film in Rotary Sealing Contacts: Part II: A new measuring principle for lubricant film thickness. *Journal of Tribology*. 1992, vol. 114, issue 2, s. 290.
- [23] POLL, G., A. GABELLI, P. G. BINNINGTON a J. QU. Dynamic Mapping of Rotary Lip Seal Lubricant Films by Fluorescent Image Processing. In: NAU, B. *Fluid sealing*. Boston: Kluwer Academic Publishers, c1992. ISBN 079231669x.

- [24] HARTL, Martin. *Měření a studium velmi tenkých mazacích filmů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování, 2002. 104 s. Habilitační práce.
- [25] MARX, Nigel, Johan GUEGAN a Hugh A SPIKES. Elastohydrodynamic film thickness of soft EHL contacts using optical interferometry. *Tribology International*. 2016, 99, 267-277. DOI: 10.1016/j.triboint.2016.03.020. ISSN 0301679x. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X16300287>
- [26] NEČAS, D. *The Effect of Synovial Fluid Constituents on Lubrication of Hip Joint Replacements*. PhD thesis. Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Machine and Industrial Design. Supervisor: prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
- [27] FORD, R. A. J. a C. A. FOORD. Laser-based fluorescence techniques for measuring thin liquid films. *Wear*. 1978, vol. 51, issue 2, s. 289-297. DOI: 10.1016/0043-1648(78)90267-3.
- [28] SUGIMURA, J., M. HASHIMOTO, Y. YAMAMOTO. Study of elastohydrodynamic contacts with fluorescence microscope. *Tribology Series*, 2000, 38: 609-617.
- [29] HIDROVO, C. H. a D. P. HART. Dual Emission Laser Induced Fluorescence technique (DELIF) for oil film thickness and temperature measurement. In: *FED*. 2000, s. 175-182. ISSN 0888-8116.
- [30] HIDROVO, C. H. a D. P. HART. Emission reabsorption laser induced fluorescence (ERLIF) film thickness measurement. *Measurement Science and Technology*. 2001-04-01, vol. 12, issue 4, s. 467-477. DOI: 10.1088/0957-0233/12/4/310.
- [31] REDDYHOFF, T., J. H. CHOO, H. A. SPIKES a R. P. GLOVNEA. Lubricant Flow in an Elastohydrodynamic Contact Using Fluorescence. *Tribology Letters*. 2010, vol. 38, issue 3, s. 207-215. DOI: 10.1007/s11249-010-9592-6.
- [32] PONJAVIC, Aleks, Mourad CHENNAOUI a Janet S. S. WONG. Through-Thickness Velocity Profile Measurements in an Elastohydrodynamic Contact. *Tribology Letters*. 2013, 50(2), 261-277. DOI: 10.1007/s11249-013-0118-x. ISSN 1023-8883. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s11249-013-0118-x>
- [33] STRUBEL, V., S. SIMOENS, P. VERGNE, et al. Fluorescence Tracking and μ -PIV of Individual Particles and Lubricant Flow in and Around Lubricated Point Contacts. *Tribology Letters*. 2017, 65(3), -. DOI: 10.1007/s11249-017-0859-z. ISSN 1023-8883. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s11249-017-0859-z>
- [34] NEČAS, D. *Analýza utváření mazacího filmu v náhradách kyčelního kloubu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování, 2014. 73 s. Vedoucí pojednání ke státní doktorské zkoušce prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
- [35] HAMROCK, Bernard J. a Duncan DOWSON. Elastohydrodynamic Lubrication of Elliptical Contacts for Materials of Low Elastic Modulus I—Fully Flooded Conjunction. *Journal of Lubrication Technology*. 1978, 100(2), 236-. DOI: 10.1115/1.3453152. ISSN 00222305. Dostupné také z: <http://Tribology.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1463922>

- [36] NIJENBANNING, G., C.H. VENNER a H. MOES. Film thickness in elastohydrodynamically lubricated elliptic contacts. *Wear*. 1994, 176(2), 217-229. DOI: 10.1016/0043-1648(94)90150-3. ISSN 00431648. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0043164894901503>
- [37] HAMROCK, B. J. a D. DOWSON. Isothermal EHL point contacts, Part III – Fully flooded results. *Journal of Lubrication Technology*, 1977, roč. 99, č. 2, s. 264-275. DOI 10.1115/1.3453074.
- [38] SMEETH, M. a H.A. SPIKES. The Influence of Slide/Roll Ratio on the Film Thickness of an EHD Contact Operating Within the Mixed Lubrication Regime. *The Third Body Concept*. 1996, , 695-703. DOI: 10.1016/S0167-8922(08)70831-9. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167892208708319>

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

9.1 Seznam použitých zkratk

DEFIL	- Dual Emission Laser Induced Fluorescence
EHD	- Elastohydrodynamic
EHL	- Elastohydrodynamic lubrication
EPDM	- Ethylene Propylene Diene Monomer
ERLIF	- Emission Reabsorption Laser Induced Fluorescence
FKM	- Fluorocarbon rubber
FRAP	- Fluorescence Recovery After Photobleaching
GLY	- Glycerol
I-EHL	- Isoviscous Elastohydrodynamic lubrication
MTM	- Mini Traction Machine
NBR	- Nitrile Butadiene Rubber
PDMS	- Polydimethylsiloxane
PG	- Polyglycol 460
sCMOS	- Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
SRR	- Slide-to-roll ratio
μ -PIV	- Micro-particle Image Velocimetry

9.2 Seznam použitých symbolů

a	m	- poloměr centrální oblasti
D	1	- poměr $R'_x/R'_y = 1$ pro kruhový kontakt
E'	Pa	- redukovaný modul pružnosti
h	m	- velikost mezery v závislosti na vzdálenosti od středu kontaktu
h_c^H	m	- centrální tloušťka filmu dle Hamrocka a kol. [35]
h_c^N	m	- centrální tloušťka filmu dle Nijenhanninga a kol. [36]
k	1	- parametr elipticity
M	1	- bezrozměrný Moesův parametr zatížení
p_{max}	Pa	- maximální kontaktní tlak
r	m	- vzdálenost od středu statického kontaktu
R'_x	m	- redukovaný poloměr ve směru unášivé rychlosti
R_z	μm	- nejvyšší výška profilu
u	m/s	- unášivá rychlost
\bar{U}	1	- bezrozměrný parametr rychlosti
w	N	- aplikované zatížení
\bar{W}	1	- bezrozměrný parametr zatížení
η	Pa·s	- dynamická viskozita maziva

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1 Schématický princip MTM [6].	13
Obr. 2-2 Stribeckova křivka pro tři různé drsnosti povrchu disku [6].	14
Obr. 2-3 Schéma principu optické interferometrie.	16
Obr. 2-4 Schéma principu fluorescenční mikroskopie.	17
Obr. 2-5 Schéma použité měřicí aparatury [20].	18
Obr. 2-6 Pokles intenzity fluorescence v závislosti na čase [27].	19
Obr. 2-7 Schéma použité měřicí aparatury [23].	20
Obr. 2-8 Schéma použité kalibrace [23].	20
Obr. 2-9 Schéma experimentu (DELIF) [29].	21
Obr. 2-10 Schématické znázornění principu ERLIF [30].	21
Obr. 2-11 Mapa intenzity fluorescence vlevo; průběh intenzity fluorescence a porovnání s tloušťkou filmu získané z optické interferometrie vpravo [31].	22
Obr. 2-12 Výsledky formování maziva metodou fotovybělení; srovnání experimentu (nahore) a predikce (dole). Bílá šipka označuje klznou rychlost maziva [32].	23
Obr. 2-13 Pozorování zpětného toku fluorescenčních částic (barevné kroužky) v eliptickém kontaktu ($k = 3,4$) ocelového soudečku a skleněného disku při unášivé rychlosti 0,5 m/s a zatížení 50 N [33].	23
Obr. 2-14 Schéma experimentálního zařízení [10].	24
Obr. 2-15 Srovnání teoretických a naměřených tloušťek filmu při plně zaplaveném kontaktu [10].	24
Obr. 2-16 Schéma tří konfigurací kontaktních oblastí [11].	26
Obr. 2-17 Mapa tloušťky filmu pro konfiguraci (a) při zatížení 23,5 N; vstup do kontaktu je vždy vpravo [11].	26
Obr. 2-18 Profily tloušťky filmu středem kontaktu pro $y = 0$ z naměřených dat na Obr. 2-16 vlevo; vykreslení parametru konvergence vpravo [11].	27
Obr. 2-19 Mapa tloušťky filmu pro konfiguraci (b) vlevo; mapa tloušťky filmu pro konfiguraci (c) vpravo [11].	27
Obr. 4-1 Stokesův posun.	30
Obr. 4-2 Schéma měřicí aparatury využívané v diplomové práci [34].	31
Obr. 4-3 Panel s nahranými snímky vlevo; panel s výpisem tloušťek filmu vpravo.	33
Obr. 4-4 Statický kontakt v zobrazovací oblasti softwaru vlevo; vykreslení tloušťky filmu v závislosti na vzdálenosti od středu kontaktu vpravo.	33
Obr. 4-5 Srovnání statického kontaktu po kalibraci s Hertzovou teorií.	34
Obr. 5-1 Naměřené intenzity fluorescence pro vybrané kombinace maziv, fluorescenčních barviv a filtrů.	37
Obr. 5-2 Artefakty materiálu EPDM.	37
Obr. 5-3 Naměřená centrální tloušťka filmu pro keramický vzorek.	38
Obr. 5-4 Vykreslení profilů tloušťky filmu středem kontaktu ve směru unášivé rychlosti pro keramický vzorek, vstup do kontaktu je vlevo.	39
Obr. 5-5 Centrální tloušťka filmu pro vzorek z fenolové pryskyřice pro různé unášivé rychlosti.	39
Obr. 5-6 Profily tloušťky filmu ve směru unášivé rychlosti středem kontaktu pro vzorek z fenolové pryskyřice; vstup do kontaktu je vlevo.	40
Obr. 5-7 Hodnoty centrální tloušťky filmu pro NBR vzorek v závislosti na rychlosti pro $SRR = 0$.	41

- Obr. 5-8** Mapy tloušťky filmu v závislosti na unášivé rychlosti pro čisté valení NBR kuličky po skleněném disku; zatížení kontaktu činí 0,2 N; použité mazivo je GLY; vstup do kontaktu je vždy vlevo; snímky jsou 3,8 x 3,8 mm velké. 41
- Obr. 5-9** Vykreslené profily tloušťky filmu v závislosti na vzdálenosti od středu kontaktu z naměřených dat na Obr. 5-6; vstup do kontaktu je vlevo. 42
- Obr. 5-10** Hodnoty centrální tloušťky filmu pro NBR vzorek v závislosti na rychlosti při $SRR = -0,4$. 42
- Obr. 5-11** Mapy tloušťky filmu v závislosti na unášivé rychlosti; $SRR = -0,4$; zatížení kontaktu činí 0,2 N; použité mazivo je GLY; vstup do kontaktu je vždy vlevo; snímky jsou 3,8 x 3,8 mm velké. 43
- Obr. 5-12** Vykreslené profily tloušťky filmu v závislosti na vzdálenosti od středu kontaktu z naměřených dat na Obr. 5-11; vstup do kontaktu je vlevo. 43
- Obr. 5-13** Hodnoty centrální tloušťky filmu pro NBR vzorek v závislosti na rychlosti při $SRR = -0,8$. 44
- Obr. 5-14** Hodnoty centrální tloušťky filmu pro NBR vzorek v závislosti na rychlosti při $SRR = -1,2$. 44
- Obr. 5-15** Mapy tloušťky filmu v závislosti na unášivé rychlosti; $SRR = -1,2$; zatížení kontaktu činí 0,2 N; použité mazivo je GLY; vstup do kontaktu je vždy vlevo; snímky jsou 3,8 x 3,8 mm velké. 45
- Obr. 5-16** Vykreslené profily tloušťky filmu v závislosti na vzdálenosti od středu kontaktu z naměřených dat na Obr. 5-15; vstup do kontaktu je vlevo. 45
- Obr. 5-17** Hodnoty centrální tloušťky filmu pro NBR vzorek v závislosti na rychlosti při $SRR = -1,6$. 46
- Obr. 5-18** Hodnoty centrální tloušťky filmu pro NBR vzorek v závislosti na rychlosti při $SRR = -2$. 46
- Obr. 5-19** Mapy tloušťky filmu v závislosti na unášivé rychlosti; $SRR = -2$; zatížení kontaktu činí 0,2 N; použité mazivo je GLY; vstup do kontaktu je vždy vlevo; snímky jsou 3,8 x 3,8 mm velké. 47
- Obr. 5-20** Vykreslené profily tloušťky filmu v závislosti na vzdálenosti od středu kontaktu z naměřených dat na Obr. 5-19; vstup do kontaktu je vlevo. 47
- Obr. 5-21** Hodnoty centrální tloušťky filmu pro NBR vzorek v závislosti na rychlosti při $SRR = 0,4$. 48
- Obr. 5-22** Mapy tloušťky filmu v závislosti na unášivé rychlosti; $SRR = 0,4$; zatížení kontaktu činí 0,2 N; použité mazivo je GLY; vstup do kontaktu je vždy vlevo; snímky jsou 3,8 x 3,8 mm velké. 48
- Obr. 5-23** Vykreslené profily tloušťky filmu v závislosti na vzdálenosti od středu kontaktu z naměřených dat na Obr. 5-22; vstup do kontaktu je vlevo. 49
- Obr. 5-24** Hodnoty centrální tloušťky filmu pro NBR vzorek v závislosti na rychlosti při $SRR = 0,8$. 49
- Obr. 5-25** Hodnoty centrální tloušťky filmu pro NBR vzorek v závislosti na rychlosti při $SRR = 1,2$. 50
- Obr. 5-26** Hodnoty centrální tloušťky filmu pro NBR vzorek v závislosti na rychlosti při $SRR = 1,6$. 50
- Obr. 5-27** Mapy tloušťky filmu v závislosti na unášivé rychlosti; $SRR = 1,6$; zatížení kontaktu činí 0,2 N; použité mazivo je GLY; vstup do kontaktu je vždy vlevo; snímky jsou 3,8 x 3,8 mm velké. 51

- Obr. 5-28** Vykreslené profily tloušťky filmu v závislosti na vzdálenosti od středu kontaktu z naměřených dat na Obr. 5-27; vstup do kontaktu je vlevo. 51
- Obr. 5-29** Hodnoty centrální tloušťky filmu pro NBR vzorek v závislosti na rychlosti při $SRR = 2$. 52
- Obr. 5-30** Mapy tloušťky filmu v závislosti na unášivé rychlosti; $SRR = 2$; zatížení kontaktu činí 0,2 N; použité mazivo je GLY; vstup do kontaktu je vždy vlevo; snímky jsou 3,8 x 3,8 mm velké. 52
- Obr. 5-31** Vykreslené profily tloušťky filmu v závislosti na vzdálenosti od středu kontaktu z naměřených dat na Obr. 5-32; vstup do kontaktu je vlevo. 52
- Obr. 5-32** Centrální tloušťka v závislosti na stupni prokluzu pro různé střední rychlosti – 10 mm/s, 50 mm/s, 100 mm/s, 200 mm/s, 300 mm/s a 400 mm/s. 54
- Obr. 6-1** Ověřovací experiment naměřených centrálních tlouštěk pro mazivo GLY při čistém valení. 55
- Obr. 6-2** Centrální tloušťka filmu v závislosti na unášivé rychlosti při zatížení 25 mN pro mazivo GLY a $SRR = 2$. Plná čára představuje teoretickou predikci dle Hamrocka a kol. pro viskozitu $\eta = 0,15 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ [10]. 56
- Obr. 6-3** Centrální tloušťka filmu v závislosti na SRR pro vybrané střední rychlosti v poddajném kontaktu pro mazivo PG vlevo; závislost SRR na centrální tloušťce filmu v tuhém kontaktu vpravo[38]. 57

11 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1

Článek: *The effect of kinematic conditions on film thickness in compliant lubricated contact.*